

نسبت جابه‌جایی غیرالاستیک سیستم‌های دارای زوال تحت اثر زلزله‌های حوزه نزدیک گسل پالس گونه و بدون پالس

سیدابراهیم مطلبی^۱، مهدی پورشاء^{۲*}، زهره بهلولی^۳

^۱ کارشناس ارشد مهندسی زلزله، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز

^۲ دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز

^۳ دانشجوی دکتری مهندسی سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز

دریافت: ۱۴۰۱/۵/۲۴، بازنگری: ۱۴۰۱/۱۱/۱۲، پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۱۹، نشر آنلاین: ۱۴۰۱/۱۱/۱۹

چکیده

در آیین‌نامه‌های طراحی سازه‌ها در برابر زلزله، با کاهش مقاومت سازه نسبت به حالت الاستیک اجازه تغییر شکل‌های فراتر جایی به سازه داده می‌شود. کاهش در مقاومت، باعث ورود سازه به مرحله غیرالاستیک می‌گردد. از این‌رو، محاسبه و کنترل تغییر مکان غیرالاستیک یک سازه حائز اهمیت است. در این مطالعه، نتایج یک مطالعه تحلیلی با هدف ارزیابی نسبت جابه‌جایی غیرالاستیک (C_{II}) برای سیستم‌های یک درجه آزاد که در معرض ۷۸ زمین‌لرزه حوزه دور و نزدیک گسل در ساختمان‌های D و C (منطبق بر آیین‌نامه NEHRP2003) قرار گرفته‌اند، ارائه می‌شود. زلزله‌های حوزه نزدیک گسل شامل رکوردهای با اثر پرتابی، جهت‌داری پیش‌رونده و بدون پالس می‌باشند. در این مطالعه، تأثیر پیوند ارتعاش، پیوند پالس، سطح شکل‌پذیری و نسبت میرایی مورد بررسی قرار می‌گیرد. همچنین برای بررسی تأثیر زوال چرخه‌ای، از رفتار هیسترتیک دو خطی (Bilinear Hysteretic) با مدل اصلاح شده ایبارا-مدینا-کراوینکلر (Modified Ibarra-Medina-Krawinkler) استفاده می‌شود. در این پژوهش، یک مقایسه جامع و کامل برای C_{II} تحت اثر انواع مختلف رکوردهای زلزله حوزه نزدیک و دور از گسل انجام شده و نتایج با رابطه پیشنهادی FEMA 440 و همچنین رابطه ارائه شده توسط Miranda مورد مقایسه قرار می‌گیرد. مطالعه حاضر نشان می‌دهد که روابط موجود برای ضریب C_{II} بر پایه رکوردهای حوزه دور از گسل، برای ارزیابی C_{II} تحت اثر رکوردهای حوزه نزدیک گسل دارای پالس، به‌ویژه رکوردهای با اثر پرتابی، مناسب نبوده و باعث طراحی غیرایمن سازه می‌شود. در نهایت، با استفاده از نتایج به‌دست آمده در این مطالعه و با بهره‌جویی از تحلیل رگرسیون غیرخطی، روابطی برای نسبت جابه‌جایی غیرالاستیک برای دسته‌های مختلف رکورد زلزله ارائه می‌گردد.

کلیدواژه‌ها: نسبت جابه‌جایی غیرالاستیک، حوزه نزدیک گسل، اثر پرتابی، اثر جهت‌داری پیش‌رونده، رکورد حوزه نزدیک بدون پالس، حوزه دور از گسل.

۱- مقدمه

خاک، بزرگی و فاصله از گسل بر C_{II} ، پرداخت. این نتیجه حاصل شد که تأثیر بزرگی و فاصله از گسل بر نسبت جابه‌جایی غیرالاستیک ناچیز می‌باشد. در نهایت، با استفاده از آنالیز رگرسیون، معادله‌ای برای نسبت جابه‌جایی غیرالاستیک پیشنهاد شد (Miranda, ۲۰۰۰b).

در مطالعه دیگری، Miranda نشان داد که نسبت تغییر مکان غیرالاستیک در محدوده پیوندهای کوچک، بزرگ‌تر از یک بوده و همچنین در این محدوده مقدار این نسبت کاملاً به پیوند (T) و شکل‌پذیری (μ) بستگی خواهد داشت، اما برای زمان‌های تناوب بزرگ‌تر از یک ثانیه، مقدار این نسبت، فقط به μ بستگی داشته و

در آیین‌نامه‌های طراحی سازه‌ها در برابر زلزله، با کاهش مقاومت سازه نسبت به حالت الاستیک اجازه تغییر شکل‌های فراتر جایی به سازه داده می‌شود. کاهش در مقاومت، باعث ورود سازه به مرحله غیرالاستیک می‌شود. از این‌رو، محاسبه و کنترل تغییر مکان غیرالاستیک حائز اهمیت است. بنابراین، بررسی نسبت جابه‌جایی غیرالاستیک (C_{II}) که به‌صورت جابه‌جایی غیرالاستیک (u_{II}) تقسیم بر جابه‌جایی الاستیک (u_e) سیستم یک درجه آزاد متناظر تعریف می‌شود، مورد توجه قرار گرفته است. Miranda به ارزیابی تأثیر پیوند ارتعاش، شکل‌پذیری، شرایط

* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۴۱-۳۳۴۵۹۳۸۸

فرودبیواره قرار می‌گیرند (Shuang Li و Xie و ۲۰۰۷).

مقایسه هر دو تحریک دور و نزدیک گسل، در تحقیق Chintanapakdee و Chopra (۲۰۰۱) نشان داد که نسبت $\frac{u_m}{u_0}$ برای پیوندهای خیلی طولانی برابر ۱ و در ناحیه حساس به شتاب، بزرگتر از ۱ و برای $T_n < T_a$ تقریباً معادل شکل‌پذیری می‌باشد، درحالی‌که در ناحیه شتاب ثابت، $\frac{u_m}{u_0}$ برای حرکت نزدیک به گسل، بزرگتر از حرکات دور از گسل می‌باشد. بنابراین تغییر شکل حداکثر سیستم غیرالاستیک در حوزه نزدیک در صورتی‌که از داده‌های حوزه دور از گسل استفاده شود، به‌طور قابل توجه دست پایین محاسبه می‌شود.

Zhai و همکاران (۲۰۰۷) اثرات رکوردهای پالس‌گونه را بررسی کردند و ملاحظه کردند که سرعت حداکثر زمین (PGV) تأثیر کوچکی بر C_{II} برای زلزله‌های حوزه نزدیک در پیوندهای طولانی می‌گذارد. نسبت جابه‌جایی غیرالاستیک با خرابی ثابت (C_{DI})، برای سه مدل هیسترتیک و ۸۱ حرکت پالس‌گونه حوزه نزدیک توسط Wen و همکاران (۲۰۱۴) محاسبه شد و تأثیر حرکات پالس‌گونه حوزه نزدیک، پیوند نرمالیزه شده، بزرگی زلزله، فاصله از گسل، حداکثر سرعت زمین، ماکزیمم نمو سرعت، رفتار کاهشی سازه‌ها و ضریب شکل‌پذیری نهایی روی نسبت جابه‌جایی غیرالاستیک بررسی شد. همچنین شاخص خرابی اصلاح‌شده Park-Ang، برای ارزیابی عملکرد خرابی سازه انتخاب شد. سپس نسبت جابه‌جایی غیرالاستیک با خرابی ثابت برای سیستم یک درجه آزادی غیرالاستیک محاسبه شد. مطالعه نشان داد که حرکات پالس‌گونه حوزه نزدیک در مقایسه با حرکات معمولی زمین، به‌طور قابل ملاحظه‌ای C_{DI} را برای سازه‌های با پیوند متوسط افزایش می‌دهند که بیشترین مقدار این افزایش به ۳۸٪ می‌رسد.

در بررسی دیگری، Guo و همکاران (۲۰۲۲) به بررسی نسبت جابه‌جایی غیرالاستیک در سیستم‌های یک درجه آزاد بدون زوال با تجهیزات هیسترتیک ویسکوز خود مرکز گرا پرداختند. از جمله نتایج این بود که میانگین طیف نسبت جابه‌جایی غیرالاستیک با شکل‌پذیری ثابت، تحت زلزله‌های پالس‌گونه نزدیک گسل، به‌جز در موارد بسیار نادر، همیشه بزرگتر از طیف زلزله‌های دور گسل است.

حسنی و همکاران (۱۳۹۲) بزرگا و فاصله تا گسل، میزان سخت‌شوندگی بعد از تسلیم و رفتار هیسترتیک^۱ سازه، روی نسبت تغییرمکان غیرالاستیک را مطالعه کردند. بررسی آن‌ها نشان داد که تأثیر T_p (پیوند پالس) بر پاسخ سازه‌ها در زلزله‌های پالس گونه حوزه نزدیک زیاد می‌باشد. همچنین نرمالیزه کردن محور زمان با T_D (زمان تناوب مربوط به بیشترین مقدار تغییرمکان

مستقل از T می‌باشد. اثر شرایط ساختگاهی متفاوت بر روی نسبت تغییرمکان غیرالاستیک، C_{II} ، ناچیز می‌باشد. سپس رابطه‌ای با استفاده از آنالیز رگرسیون غیرخطی برای محاسبه میانگین نسبت تغییرمکان غیرالاستیک پیشنهاد شد (Miranda و ۲۰۰۰a).

در بررسی دیگری تأثیر پیوند، میزان مقاومت جانبی تسلیم، شرایط خاک، بزرگی، فاصله از منبع و سخت‌شوندگی کرنشی مورد مطالعه قرار گرفت. یک رابطه ساده پیشنهاد شد که می‌تواند برای ارزیابی نسبت جابه‌جایی غیرالاستیک سازه‌های واقع در ساختگاه آبرفتی مورد استفاده قرارگیرد (Ruiz-García و Miranda، ۲۰۰۳).

در پژوهشی دیگر، تأثیر پیوند ارتعاش نرمالیزه شده به پیوند غالب حرکت زمین، میزان تغییرشکل غیرالاستیک، بزرگی و فاصله از گسل مورد بحث قرار گرفت. همچنین برای بررسی تأثیر کاهش سختی بر نسبت جابه‌جایی غیرالاستیک، میانگین نسبت ماکزیمم تغییرمکان غیرالاستیک موردنیاز سیستم دارای سختی کاهشی به ماکزیمم تغییرمکان غیرالاستیک موردنیاز سیستم بدون کاهش سختی محاسبه شد. دو رفتار هیسترتیک الاستوپلاستیک غیرخطی و رفتار هیسترتیک اصلاح‌شده در این مطالعه در نظر گرفته شد (Ruiz-García و Miranda، ۲۰۰۴).

مطالعه دیگری نشان داد که اثر بزرگی و فاصله از گسل بر نسبت جابه‌جایی غیرالاستیک ناچیز و قابل اغماض می‌باشد. همچنین سیستم‌های دارای کاهش سختی و مقاومت، برای پیوند معادل یا کمتر از پیوند غالب زمین، جابه‌جایی غیرالاستیک بزرگتری نسبت به سیستم الاستوپلاستیک دارند (Ruiz-García و Miranda، ۲۰۰۶). نتایج بررسی دیگری از اثرات حرکات فرادیواره نشان می‌دهد که طیف نسبت جابه‌جایی غیرالاستیک برای حرکات فرادیواره، فقط در پیوندهای خیلی طولانی بزرگتر از فرودبیواره می‌باشد (Li و Shuang و ۲۰۰۷).

همچنین اثر جهت‌داری پیش‌رونده بر روی نسبت جابه‌جایی غیرالاستیک نشان داد که برای حرکاتی که تحت تأثیر جهت‌داری پیش‌رونده می‌باشند، نسبت جابه‌جایی غیرالاستیک در محدوده پیوندی بین ۰ تا ۰/۵ ثانیه کمتر از نسبت جابه‌جایی غیرالاستیک حرکات دور از گسل می‌باشد، اما برای پیوندهای بزرگتر از ۰/۵ ثانیه، این نسبت برعکس می‌شود. همچنین استفاده از روابط C_{II} بر پایه حرکات دور از گسل، منجر به ارزیابی لرزه‌ای محافظه‌کارانه برای سازه‌هایی واقع در حوزه نزدیک با پیوند اصلی کمتر از ۰/۵ ثانیه می‌شود، درحالی‌که برای پیوندهای بزرگتر از ۰/۵ ثانیه باعث ارزیابی لرزه‌ای غیرمحافظه‌کارانه خواهد شد. همچنین نتایج نشان داد که پاسخ جابه‌جایی غیرالاستیک در محدوده پیوندی کوتاه، تحت تأثیر فرادیواره و در محدوده پیوندی طولانی، تحت تأثیر

رکوردهای حوزه نزدیک گسل، اغلب حاوی یک یا چند پالس مجزا در تاریخچه زمانی شتاب، سرعت و جابه‌جایی می‌باشند که وجود پالس در تاریخچه زمانی سرعت معمول‌تر می‌باشد. در مجاورت یک گسل فعال، حرکات زمین تحت تأثیر مکانیزم گسلش، جهت انتشار شکست نسبت به ساختگاه (جهت رو به جلو) و نیز تغییر شکل استاتیکی محتمل سطح زمین همراه با اثر پرتابی قرار می‌گیرند. زلزله‌شناسان، اثر پرتابی و جهت‌داری پیش‌رونده را به‌عنوان مشخصات اصلی حرکات زمین در حوزه نزدیک گسل شناسایی کرده‌اند. با مروری بر مطالعات انجام شده در زمینه نسبت جابه‌جایی غیرالاستیک، با توجه به این‌که قبلاً، مطالعاتی در زمینه اثر رکوردهای حوزه دور و حوزه نزدیک گسل دارای اثر جهت‌داری پیش‌رونده بر روی C_{II} انجام شده است، ولی تاکنون تأثیر رکوردهای حوزه نزدیک با ویژگی اثر پرتابی و بدون پالس و مقایسه آن‌ها با رکوردهای دارای اثر جهت‌داری پیش‌رونده و حوزه دور از گسل بررسی نشده است. از این‌رو، مطالعه حاضر، به ارزیابی نسبت جابه‌جایی غیرالاستیک تحت اثر رکوردهای حوزه نزدیک گسل شامل اثر جهت‌داری پیش‌رونده و اثر پرتابی، حوزه نزدیک بدون پالس و حوزه دور از گسل می‌پردازد و روابطی را برای این نسبت تحت اثر دسته رکوردهای مختلف زلزله ارائه می‌دهد.

۲- روش تحقیق

۲-۱- مدل‌سازی عددی

برای انجام تحلیل‌های خطی و غیرخطی از مدل سیستم یک درجه آزادی استفاده شده است که مشخصات آن در بخش (۲-۳) آمده است. بدین‌صورت که مدل از یک ستون با مصالح الاستیک به‌همراه جرم متمرکز در بالای آن تشکیل شده است که در محل تکیه‌گاه، فنری پیچشی به تکیه‌گاه متصل شده و به این فنر ویژگی‌های هیسترتیک اختصاص داده شده است (Adam, 2008؛ Poursha و Norouzi, 2018 و 2021). در مدل‌سازی، جرم ثابت فرض شده و با تغییر زمان تناوب، سختی سیستم نیز تغییر می‌کند. برای انجام تحلیل‌های تاریخچه زمانی خطی و غیرخطی از روش ضمنی نیومارک با شتاب ثابت ($\beta = \frac{1}{4}$ و $\gamma = \frac{1}{2}$) استفاده شد. رفتار هیسترتیک مورد مطالعه، برگرفته از مدل اصلاح‌شده ایبارا، مدینا و کراوینکلر با پاسخ هیسترتیک دوخطی (IMK)^۵ می‌باشد.

۲-۲- مدل الاستوپلاستیک کامل

در این مدل، منحنی رفتاری در ابتدا به‌صورت الاستیک با سختی k بوده و زمانی که نیرو به مقاومت تسلیم f_r برسد، تسلیم

طیفی با میرایی $(\delta/5)$ روند تغییرات نسبت تغییرمکان غیرالاستیک را بهتر نشان می‌دهد. از جمله نتایج تأثیر ناچیز بزرگا و فاصله تا گسل می‌باشد و با افزایش میزان پریرود، تأثیر سخت‌شوندگی بر نسبت جابه‌جایی غیرالاستیک کاهش می‌یابد. همچنین اثر کاهش سختی و مقاومت بر نسبت تغییرمکان غیرالاستیک بررسی شد. نتایج نشان داد که در زمان‌های تناوب کوتاه، کاهش سختی و مقاومت باعث افزایش نسبت تغییرشکل غیرالاستیک سازه می‌شود.

در مطالعه پارسائیان و همکاران (۱۳۹۱)، نسبت تغییرمکان غیرالاستیک با استفاده از رکوردهای پالس‌گونه حوزه نزدیک گسل برای سازه‌های یک درجه آزادی با رفتار الاستوپلاستیک کامل با در نظرگیری اثر پارامترهای زمان تناوب، مقدار ضریب کاهش مقاومت، شرایط خاک، بزرگی زلزله و فاصله تا کانون زلزله ارزیابی گردید. چشم‌پوشی از اثر فاصله تا کانون زلزله در تخمین بیشینه تغییرمکان غیرالاستیک به الاستیک، برای زمان تناوب‌های کوچک‌تر از یک ثانیه، تا حدود ۲۰ درصد باعث ایجاد خطا می‌گردد و با افزایش ضریب کاهش مقاومت، میزان خطای ناشی از چشم‌پوشی از اثر فاصله تا کانون زلزله بیشتر می‌گردد.

حبیبی و پورشاء (۱۳۹۶) به بررسی ضریب کاهش مقاومت و نسبت جابه‌جایی غیرالاستیک برای زلزله‌های ایران پرداختند و روابطی را برای پارامترهای یادشده استخراج نمودند. طبق نتایج مشاهده شد که پارامترهای یاد شده به‌طور قابل توجهی به زمان تناوب سیستم، سطح شکل‌پذیری و تا حدودی به شرایط ساختگاه بستگی دارد.

Ji و همکاران (۲۰۲۲) اثرات مدل هیسترتیک، شرایط خاک، سختی پس از تسلیم، میرایی و شدت نسبی نیروی سونامی در واحد جرم به شتاب طیفی زلزله نظیر را بر نسبت‌های جابه‌جایی غیرالاستیک مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان دادند که در مقایسه با زلزله تنها، بارگذاری زلزله- سونامی می‌تواند تقاضای نسبت جابه‌جایی غیرالاستیک را به‌ویژه برای شدت‌های نسبی بالاتر افزایش دهد. از طرف دیگر، ویژگی‌های حرکات ثبت‌شده زمین در حوزه نزدیک گسل با حرکات معمولی زمین در حوزه دور از گسل متفاوت بوده و میزان آسیب در حوزه نزدیک گسل شدیدتر می‌باشد. لذا خصوصیات حرکات ثبت‌شده زمین در حوزه نزدیک گسل و تأثیر آن‌ها بر سازه‌ها نیاز به بررسی بیشتری دارد. در سال- های اخیر، بعضی از زلزله‌های معروف، مخصوصاً زلزله‌های ۱۹۹۴ نورث‌بریج^۳، ۱۹۹۵ کوبه^۲، ۱۹۹۹ از میر و ۱۹۹۹ چی‌چی^۴، فرصت تحقیقات بی‌سابقه‌ای را برای پیشبرد آگاهی در مورد مسائل حوزه نزدیک گسل فراهم ساخته‌اند (Xie و Shuang Li, 2007b).

4. Chi-Chi

5. Modified Ibarra-Medina-Krawinkler

2. Northridge

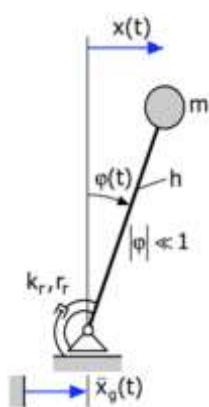
3. Kobe

منحنی پوش توسط پارامترهای سختی اولیه (الاستیک)، سخت‌شوندگی کرنشی، سختی بعد از نقطه حداکثر و شاخه مقاومت پسماند تعریف می‌شود. مقاومت پسماند به‌عنوان کسری از مقاومت تسلیم اولیه است که در مدل اصلی به‌صورت $F_r = \gamma * F_y$ بیان می‌شود. γ (gama) به‌عنوان پارامتر زوال است که با تغییر مقادیر آن نرخ زوال از کم به زیاد تغییر می‌کند. پارامترهای مدل نرم‌افزاری با استفاده از روابط ارائه‌شده در مرجع (Ibarra و Krawinkler, ۲۰۰۵) محاسبه می‌شود. در بخش (۳-۷) از این مدل برای بررسی اثر پارامتر زوال استفاده شده است.

۲-۴- مشخصات سازه یک درجه آزادی

در این پژوهش، از یک نوسان‌گر یک درجه آزادی مطابق شکل (۲) که در تکیه‌گاه به یک فنر با رفتار غیرالاستیک متصل است، استفاده شده است. این فنر دورانی با سختی اولیه به میله صلب در محل تکیه‌گاه وصل شده است.

در ابتدا تحلیل تاریخچه زمانی خطی برای سیستم یک درجه آزادی با زمان تناوب ۰/۰۲ تا ۵۰ ثانیه، برای محاسبه تغییرمکان حداکثر در سیستم الاستیک (u_0) انجام می‌شود. سپس تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی برای نسبت‌های ضریب کاهش مقاومت $R_y = 2, 4, 8$ انجام شده، مقادیر تغییر مکان حداکثر u_m ، شکل‌پذیری نیاز (μ) و نسبت حداکثر جابه‌جایی غیرالاستیک سازه به حداکثر جابه‌جایی الاستیک به‌دست می‌آیند. برای محاسبه نسبت جابه‌جایی غیرالاستیک به‌ازای نسبت شکل‌پذیری $\mu = 1.5, 4, 6$ ، از روش درونیابی استفاده می‌شود. در این مطالعه برای بررسی اثر میرایی بر پارامترهای ذکر شده از نسبت‌های میرایی صفر، ۵ و ۲۰ درصد بهره‌جویی شده است، اما جهت اختصار فقط نتایج مربوط به میرایی ۵ درصد به‌عنوان مقدار پایه برای مقایسه استفاده شده است. برای مشخص کردن بهترین گام‌های زمانی تحلیل، یک آنالیز حساسیت با گام‌های زمانی مختلف انجام شد.

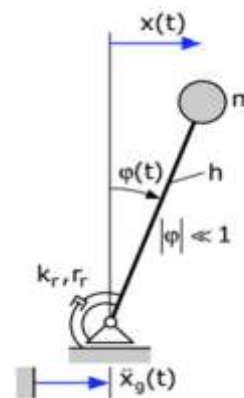
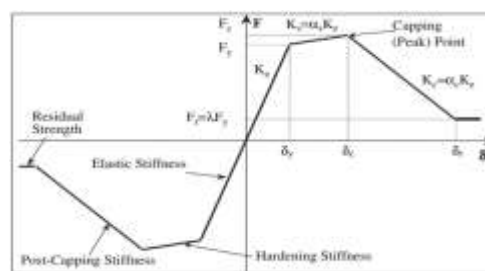
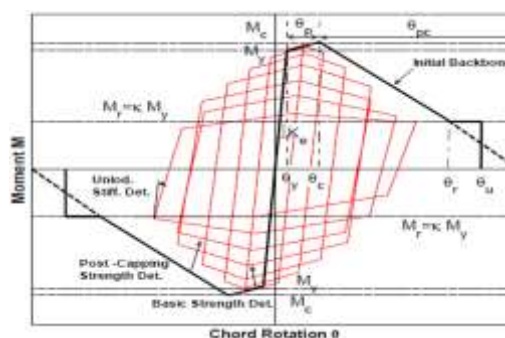


شکل ۲- مدل سیستم یک درجه آزادی (Adam, ۲۰۰۸)

آغاز می‌شود. بدین ترتیب، منحنی تنش- کرنش در این مدل به- صورت دوطرفه با شیب ثانویه صفر است و زوال در این مدل در نظر گرفته نمی‌شود (Chopra, ۲۰۱۱).

۲-۳- مدل هیسترتیک

مدل زوال ایبارا- مدینا- کراوینکلر در سال ۲۰۰۵ ارائه شد (Ibarra و همکاران, ۲۰۰۵). این مدل توسط Lignos اصلاح گردید تا بتواند رفتار هیسترتیک نامتقارن اعضا شامل نرخ زوال چرخه‌ای متفاوت در دو راستای بارگذاری، مقاومت پسماند و تغییرشکل نهایی که در آن مقاومت یک عضو به‌دلیل گسترش ترک به صفر می‌رسد را در نظر بگیرد (Lignos و Krawinkler, ۲۰۰۹). این مدل را می‌توان برای هر نوع رابطه نیرو- تغییرمکانی به کاربرد، ولی در مطالعه حاضر در قالب مقادیر لنگر- دوران مورد استفاده قرار گرفته است. منحنی پوش، مطابق شکل (۱) تعریف می‌شود و برای همه مدل‌های هیسترتیکی یکسان است.



شکل ۱- منحنی پوش برای مدل هیسترتیک

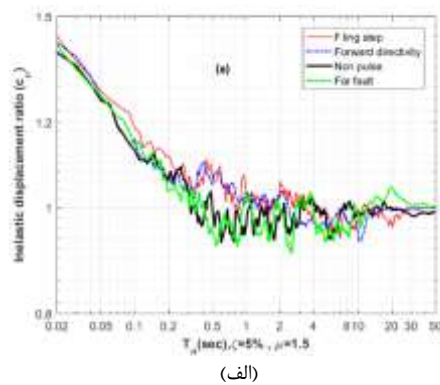
(Ibarra و همکاران, ۲۰۰۵)

سرعت و جابه‌جایی دائمی زمین منجر می‌شود که اثر پرتابی نامیده می‌شود.

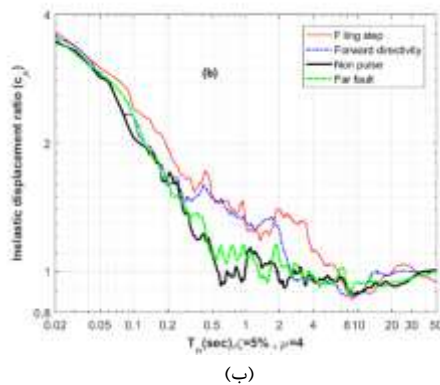
۳- نتایج و بحث

۳-۱- سیستم با مدل الاستوپلاستیک کامل

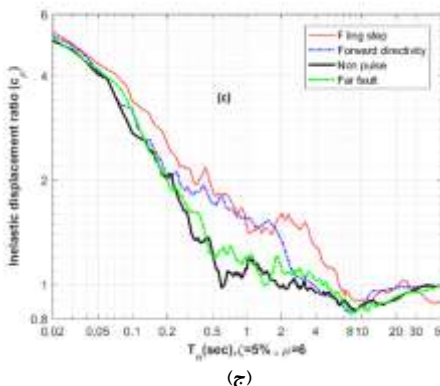
بررسی‌ها طبق شکل (۳) نشان می‌دهد که برای همه نسبت‌های شکل‌پذیری در ناحیه شتاب ثابت طیف و سازه‌های صلب، نسبت جابه‌جایی غیرالاستیک برای همه گروه‌های لرزه‌ای تقریباً برابر می‌باشد.



(الف)



(ب)



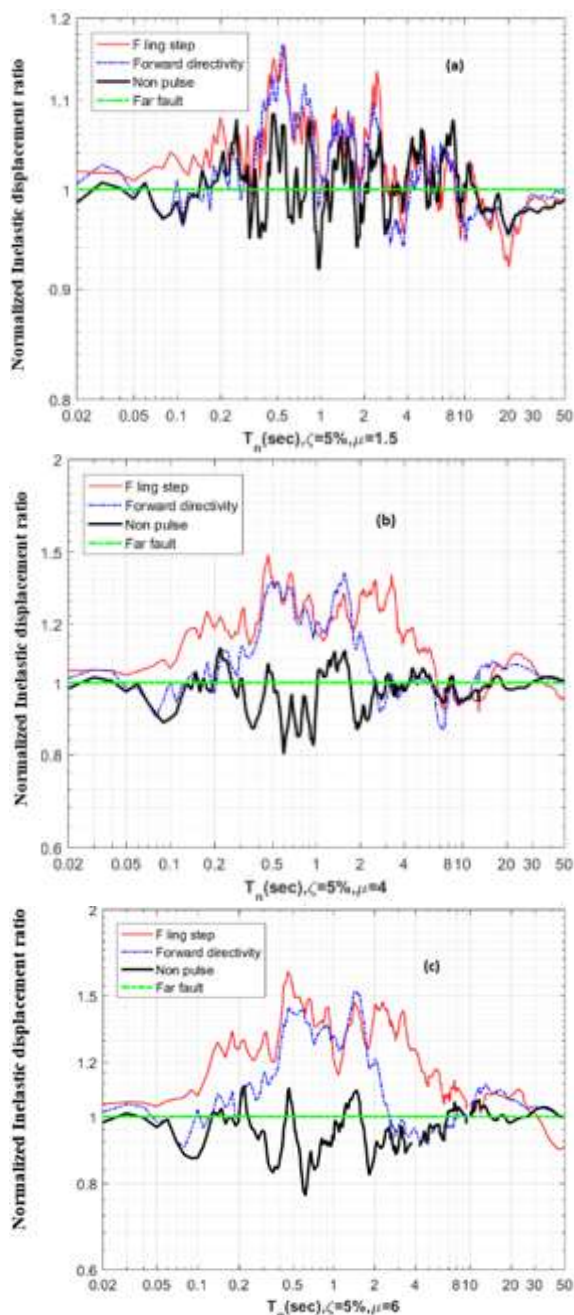
(ج)

شکل ۳- نسبت جابه‌جایی غیرالاستیک برای سیستم یک درجه آزادی تحت اثر چهار مجموعه رکورد زلزله: الف) $\mu = 1.5$ ب) $\mu = 4$ ج) $\mu = 6$

در نهایت با توجه به نتایج، برای در نظرگیری اثر زمان تناوب سیستم بر پارامترهای مورد مطالعه، از ۱۳۲۴ زمان تناوب در محدوده ۰/۰۲ تا ۵۰ ثانیه مورد استفاده قرار گرفت.

۲-۵- انتخاب شتاب‌نگاشت‌های زلزله

پارامترهای نسبت شکل‌پذیری نیاز و نسبت جابه‌جایی غیرالاستیک وابسته به نوع رکوردهای انتخابی می‌باشند. در سال‌های اخیر، این پارامترها برای مجموعه رکوردهای نزدیک گسل از نوع جهت‌داری پیش‌رونده (FD) و حوزه دور از گسل (FF) محاسبه شده است، اما تاکنون مطالعه‌ای در خصوص ارزیابی پارامترهای ذکر شده تحت اثر رکوردهای حوزه نزدیک گسل با اثر پرتابی (FS)^۸ و فاقد پالس متمایز (NP)^۹ و مقایسه انواع مختلف رکوردهای حوزه نزدیک با دور از گسل (FF) صورت نگرفته است. بنابراین در این پژوهش، مطالعه کامل و جامعی بر روی چهار دسته از رکوردهای لرزه‌ای انجام شد. دسته اول، شامل ۱۸ رکورد با مشخصه اثر پرتابی و سه گروه دیگر به ترتیب هر کدام شامل ۲۰ رکورد زلزله با مشخصه اثر جهت‌داری پیش‌رونده، حوزه نزدیک فاقد پالس متمایز و حوزه دور از گسل می‌باشند که مشخصات چهار گروه رکوردهای زلزله در مرجع (Motallebi و همکاران، ۲۰۲۱) ذکر شده است. همه رکوردها از ساختگاه‌های C و D بر اساس طبقه‌بندی ساختگاهی منطبق بر آیین‌نامه ۲۰۰۳ NEHRP بوده که از پایگاه اطلاعاتی PEER استخراج شده‌اند. رکوردهای حوزه دور از گسل و رکوردهای بدون پالس از گزارش (FEMA P695، ۲۰۰۹) رکوردهای با اثر پرتابی از مراجع (Shuai و همکاران، ۲۰۱۵؛ Song و Marek، ۲۰۱۷) و رکوردهای با اثر جهت‌داری پیش‌رونده از مرجع (Baker و Shahi، ۲۰۱۲) انتخاب شده‌اند. برای یک زمین‌لرزه مشخص، ضرایب تأثیرگذار حرکات زمین را می‌توان با استفاده از عوامل ساده مانند بزرگا، فاصله و شرایط ساختگاه طبقه‌بندی کرد، اما زمانی که فاصله به اندازه کافی کوچک باشد، عوامل دیگری نقش تعیین‌کننده‌ای را ایفا می‌کنند. تفاوت‌های حرکات زمین در مناطقی با فاصله کوچک، مستقیماً به ویژگی‌های منبع زلزله، جهت گسیختگی نسبت به سایت و جهت شیب گسیختگی گسل مرتبط می‌باشد. همه این عوامل تفاوت میان زمین‌لرزه‌های نزدیک گسل و دور از گسل را مشخص می‌سازد. یک توضیح برای اثر جهت‌داری پیش‌رونده تجمع انرژی در بازه زمانی کوتاه است که موجب زمین‌لرزه‌های ضربه‌ای با دامنه‌های بزرگ می‌شود و شکل موج پالس‌گونه و زمان دوام کوتاه در تاریخچه زمانی زمین‌لرزه‌ها دیده می‌شود. توضیح دیگر برای اثر تغییر مکان ماندگار زمین، شیب نسبی بین فرادیواره و فرودیواره می‌باشد. این اثر به یک پالس نیمه‌چرخه‌ای در تاریخچه زمانی



شکل ۴- نسبت جابه‌جایی غیرالاستیک برای سیستم یک درجه آزادی تحت چهار مجموعه رکورد- نرمالیزه شده به مقدار متناظر در حوزه دور از گسل: الف) $\mu = 1.5$ ، ب) $\mu = 4$ ، ج) $\mu = 6$

۳-۳- ضریب تغییرات (COV)

یک راه محاسبه پراکندگی پارامتر C_{μ} ، محاسبه ضریب تغییرات (COV) می‌باشد که به‌عنوان نسبت انحراف معیار به میانگین داده‌ها توسط رابطه (۱)، تعریف می‌شود (Miranda،

در شکل‌پذیری $\mu = 1.5$ مشاهده می‌شود به‌جز محدوده پریودی 0.2 تا 2 ثانیه که رکوردهای حاوی پالس (جهت‌داری پیش‌رونده و اثر پرتابی) بیشترین نسبت تغییر شکل غیرالاستیک را دارا می‌باشند، در سایر محدوده‌های پریودی، تقریباً نسبت جابه‌جایی غیرالاستیک یکسان بوده و تقریباً مستقل از نوع رکورد می‌باشد. با افزایش ضریب شکل‌پذیری مشاهده می‌شود که برای پریودهای کمتر از 0.05 ثانیه، C_{μ} برای همه مجموعه‌ها برابر می‌باشد و از 0.05 ثانیه تا 0.5 ثانیه، رکوردهای با اثر پرتابی، مقدار C_{μ} بیشتری را دارا می‌باشند.

از پریود 0.5 تا 2 ثانیه ملاحظه می‌شود که اثر وجود پالس در رکوردهای لرزه‌ای بر C_{μ} قابل‌ملاحظه می‌باشد، ولی نوع پالس در این محدوده بی‌تأثیر می‌باشد. تقریباً از پریود 2 تا 8 ثانیه، رکوردهای با اثر پرتابی بیشترین مقدار را در بین چهار مجموعه دارا می‌باشند، درحالی‌که سایر مجموعه‌ها نسبت C_{μ} یکسانی باهم دارند. در نتایج قسمت‌های بعد به‌جز بخش (۳-۷) از مدل الاستوپلاستیک کامل استفاده شده است.

۳-۲- مقایسه نتایج با نرمالیزه کردن رکوردها به حوزه دور از گسل

به‌دلیل این‌که بیشتر روابط آیین‌نامه‌ای و مطالعات انجام شده بر مبنای رکوردهای حوزه دور از گسل می‌باشد، برای محاسبه میزان اختلاف پارامترهای محاسبه‌شده برای هر مجموعه رکورد نسبت به رکوردهای حوزه دور از گسل، طیف میانگین محاسبه‌شده برای همه مجموعه رکوردهای لرزه‌ای با میرایی 5 درصد، به طیف میانگین محاسبه‌شده برای رکورد حوزه دور از گسل، نرمالیزه شد.

با بررسی نسبت جابه‌جایی غیرالاستیک برای کلیه گروه‌های لرزه‌ای نرمالیزه شده به حوزه دور از گسل در شکل (۴)، مشاهده می‌شود که در شکل‌پذیری $\mu = 1.5$ ، تقریباً در عمده زمان‌های تناوب، اختلاف نسبت جابه‌جایی غیرالاستیک برای همه گروه‌های لرزه‌ای نسبت به حوزه دور از گسل، کمتر از 10 درصد می‌باشد که قابل‌توجه است.

(۱۹۹۳).

برای پریودهای کوتاه، ضریب COV به شدت وابسته به پریود سازه بوده و در خارج از این ناحیه تأثیر پریود اندک می‌باشد. این نتایج، با نتایج حاصل از مراجع (Ruiz-garcia, ۲۰۱۱؛ Miranda, ۱۹۹۳؛ ۲۰۰۰a، ۲۰۰۰b؛ Li و Xie، ۲۰۰۷؛ Ruiz-garcia و Miranda، ۲۰۰۴) مطابقت دارد.

۳-۴- تحلیل اثر پریود پالس

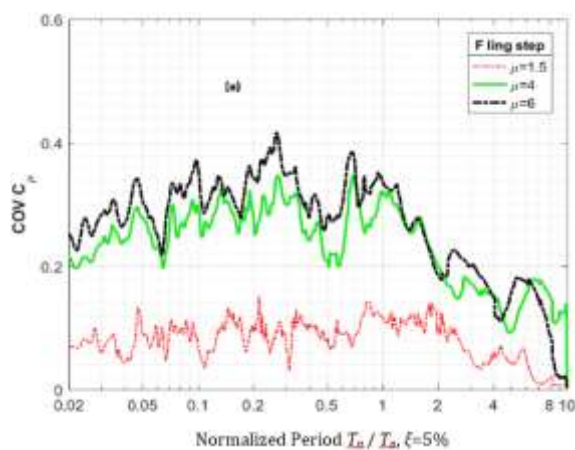
با بررسی نرمالیزه کردن پریود ارتعاش سیستم‌های یک درجه آزادی به پریود پالس سرعت برای مجموعه حرکات حوزه نزدیک گسل از نوع پرتابی و جهت‌داری پیش‌رونده در شکل (۵)، مشاهده می‌شود که نرمالیزه کردن پریود به پریود پالس سرعت باعث کاهش میزان پراکندگی نتایج برای نسبت‌های $\frac{T_n}{T_p}$ بزرگتر از ۰/۳ و باعث افزایش مقدار COV برای نسبت‌های $\frac{T_n}{T_p}$ کمتر از ۰/۳ می‌شود. مشخص کردن محدوده برای کاهش پراکندگی وابسته به نوع رکورد و مقدار پریود پالس در هر مجموعه رکورد می‌باشد. شکل (۶)، بررسی اثر پریود پالس را طبق جدول (۱) روی نسبت جابه‌جایی غیرالاستیک به‌ازای ضرایب شکل‌پذیری مختلف نشان می‌دهد. در رکوردهای با اثر پرتابی برای نسبت‌های شکل‌پذیری ۴ و ۶، به استثنای پریودهای بین ۱ تا ۴ ثانیه که پریود پالس اثر ناچیزی بر نسبت C_{μ} دارد، برای پریودهای کمتر از ۸ ثانیه، نسبت C_{μ} برای رکوردهای با پریود پالس بزرگ‌تر، بیشتر است و برای محدوده پریودی بین ۷ تا ۱۳ ثانیه بالعکس می‌باشد. در رکوردهای با اثر جهت‌داری پیش‌رونده، با نسبت شکل‌پذیری ۴ و ۶، برای پریودهای این شکل نشان می‌دهد که برای مجموعه رکوردهای با اثر پرتابی و جهت‌داری پیش‌رونده، به‌ازای ضریب شکل‌پذیری ۱/۵، اثر طبقه‌بندی پریود پالس سرعت، T_p ، به‌عنوان یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های زمین‌لرزه‌های حوزه نزدیک با اثر جهت‌داری پیش‌رونده است. پریود پالس مدت‌زمانی است که طول می‌کشد تا یک چرخه کامل سرعت یا شتاب در تاریخچه زمانی سرعت یا شتاب رخ دهد کمتر از ۰/۵ ثانیه پریود پالس اثری بر C_{μ} ندارد و برای پریودهای ۰/۵ تا ۵ ثانیه، رکوردهای با پریود پالس بزرگ‌تر، دارای C_{μ} بیشتر بوده و برای پریودهای ۵ تا ۲۰ ثانیه بالعکس است.

جدول ۱- مشخصات طبقه‌بندی پریود پالس برای ۴ مجموعه

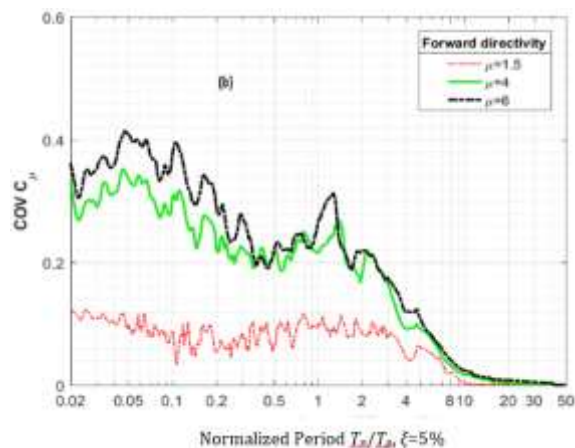
نوع رکورد برای پریود پالس	رکورد لرزه‌ای	
	گروه ۱	گروه ۲
Fling Step	$0 < T_p \leq 8 \text{ s}$	$8 < T_p \leq 13 \text{ s}$
Forward directivity	$0 < T_p \leq 4 \text{ s}$	$4 < T_p \leq 11 \text{ s}$

$$COV = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (1)$$

ضریب تغییرات در یک پریود معین به‌ازای سطح شکل‌پذیری مشخص و برای هر گروه لرزه‌ای در نظر گرفته شده در این مطالعه محاسبه شده است. شکل (۵) ضریب تغییرات را برای نسبت جابه‌جایی غیرالاستیک به‌ازای نسبت‌های شکل‌پذیری ۱/۵، ۴ و ۶ نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که نرمالیزه کردن پریود به پریود پالس سرعت باعث افزایش مقدار COV برای نسبت‌های $\frac{T_n}{T_p}$ کمتر از ۰/۳ می‌شود. مشخص کردن محدوده برای کاهش پراکندگی وابسته به نوع رکورد و مقدار پریود پالس در هر مجموعه رکورد می‌باشد. در کل بررسی ضریب تغییرات نشان می‌دهد که با افزایش ضریب شکل‌پذیری سیستم، مقدار COV افزایش می‌یابد.



(الف)



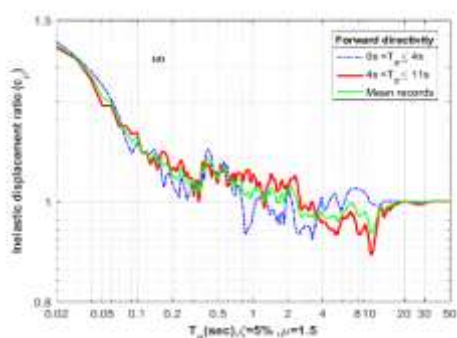
(ب)

شکل ۵- ضریب تغییرات نسبت جابه‌جایی غیرالاستیک سیستم یک درجه آزادی با نسبت‌های شکل‌پذیری ۱/۵، ۴ و ۶، با پریود ارتعاش نرمالیزه شده به پریود پالس سرعت، تحت اثر: (الف) رکوردهای با اثر پرتابی، (ب) رکوردهای با اثر جهت‌داری پیش‌رونده

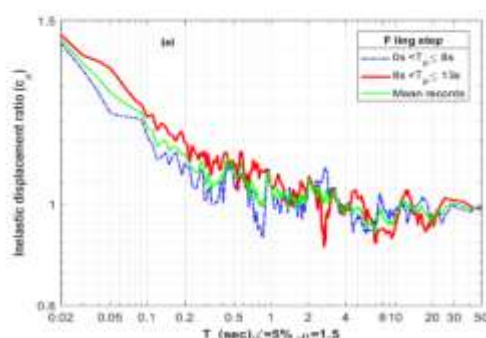
۳-۴- تحلیل اثر پیرو پالس

با بررسی نرمالیزه کردن پیرو ارتعاش سیستم‌های یک درجه آزادی به پیرو پالس سرعت برای مجموعه حرکات حوزه نزدیک گسل از نوع پرتابی و جهت‌داری پیش‌رونده در شکل (۵)، مشاهده می‌شود که نرمالیزه کردن پیرو به پیرو پالس سرعت باعث کاهش میزان پراکندگی نتایج برای نسبت‌های $\frac{T_n}{T_p}$ بزرگتر از $\frac{1}{3}$ و باعث افزایش مقدار COV برای نسبت‌های $\frac{T_n}{T_p}$ کمتر از $\frac{1}{3}$ می‌شود. مشخص کردن محدوده برای کاهش پراکندگی وابسته به نوع رکورد و مقدار پیرو پالس در هر مجموعه رکورد می‌باشد. شکل (۶)، بررسی اثر پیرو پالس را طبق جدول (۱) روی نسبت جابه‌جایی غیرالاستیک به‌ازای ضرایب شکل‌پذیری مختلف نشان

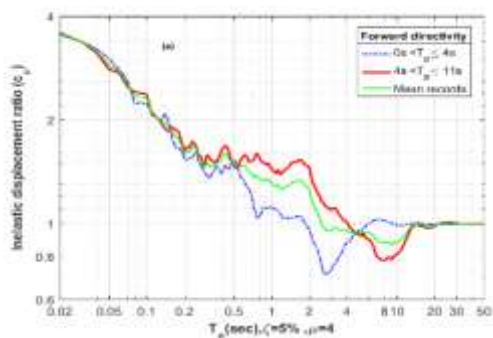
می‌دهد. در رکوردهای با اثر پرتابی برای نسبت‌های شکل‌پذیری ۴ و ۶، به‌استثنای پیرودهای بین ۱ تا ۴ ثانیه که پیرو پالس اثر ناچیزی بر نسبت C_{μ} دارد، برای پیرودهای کمتر از ۸ ثانیه، نسبت C_{μ} برای رکوردهای با پیرو پالس بزرگ‌تر، بیشتر است و برای محدوده پیرودی بین ۷ تا ۱۳ ثانیه بالعکس می‌باشد. در رکوردهای با اثر جهت‌داری پیش‌رونده، با نسبت شکل‌پذیری ۴ و ۶، برای پیرودهای این شکل نشان می‌دهد که برای مجموعه رکوردهای با اثر پرتابی و جهت‌داری پیش‌رونده، به‌ازای ضریب شکل‌پذیری $1/5$ ، اثر طبقه‌بندی پیرو پالس سرعت، T_p ، به‌عنوان یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های زمین‌لرزه‌های حوزه نزدیک با اثر جهت‌داری پیش‌رونده است.



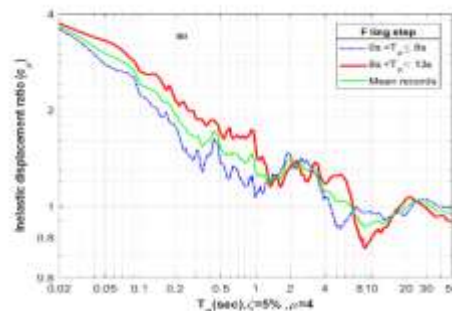
(د)



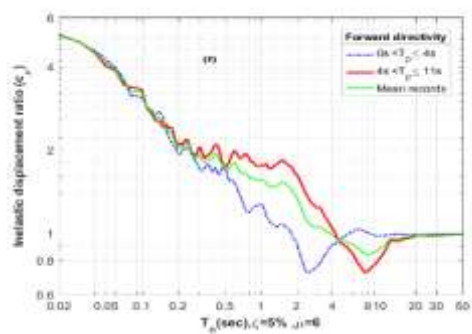
(الف)



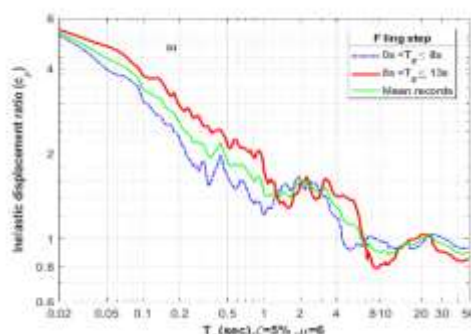
(و)



(ب)

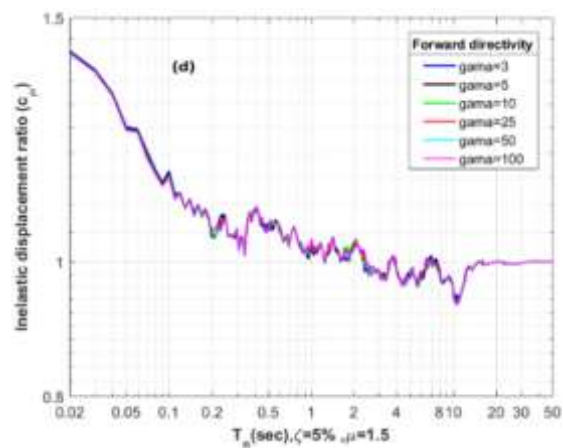


(ج)

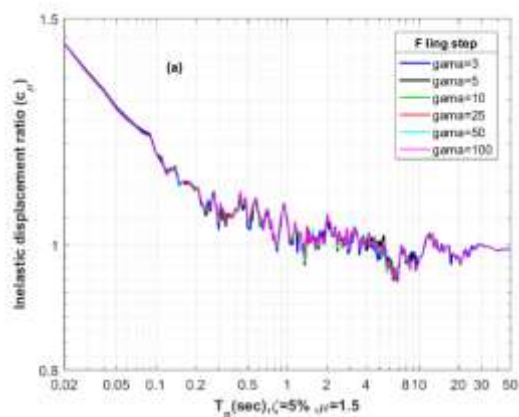


(ج)

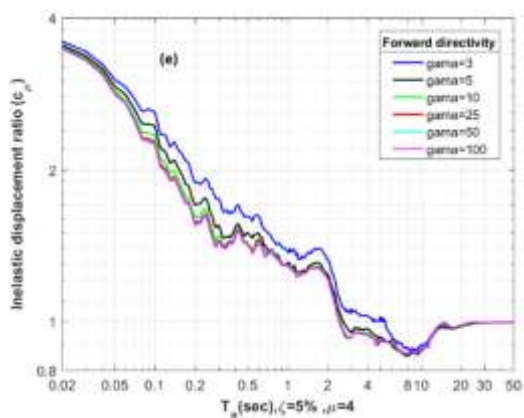
شکل ۶- اثر طبقه‌بندی پیرو پالس سرعت بر نسبت جابه‌جایی غیرالاستیک سیستم‌های یک درجه آزادی با میرایی ۵ درصد تحت اثر رکوردهای: (الف) با اثر پرتابی: (الف) $\mu = 1.5$ (ب) $\mu = 4$ (ج) $\mu = 6$ ، ۲- با اثر جهت‌داری پیش‌رونده، (د) $\mu = 1.5$ (و) $\mu = 4$ (ه) $\mu = 6$



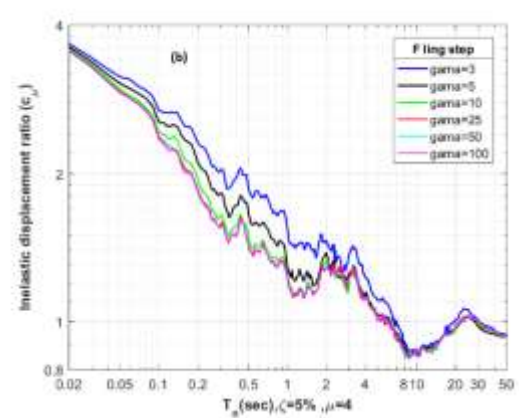
(د)



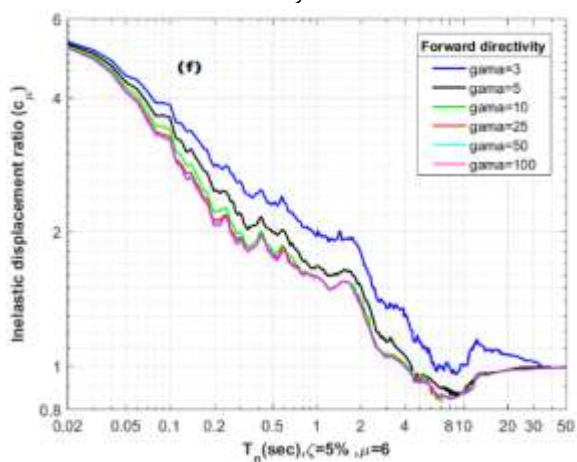
(الف)



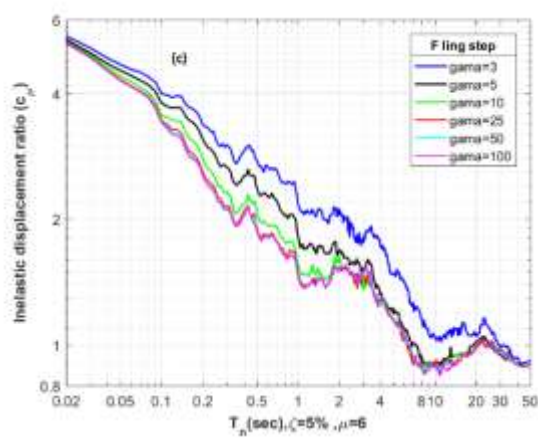
(و)



(ب)

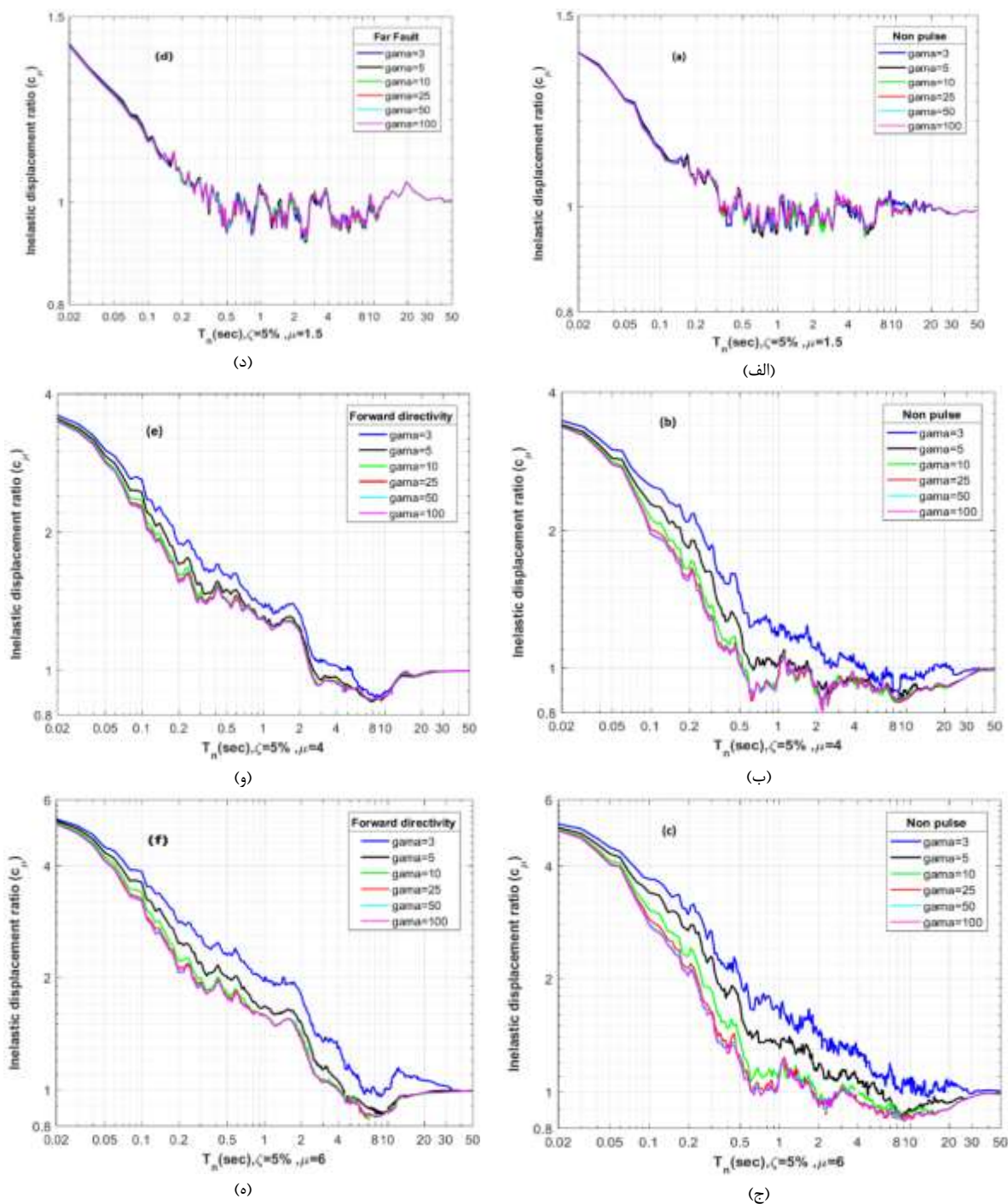


(و)



(ج)

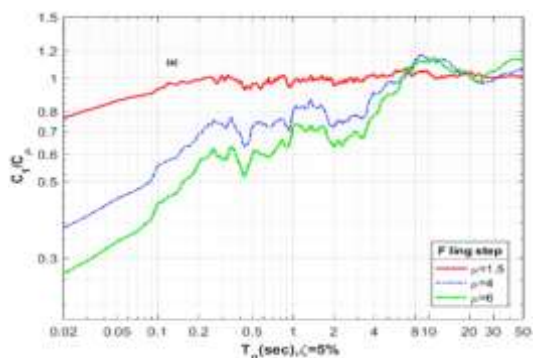
شکل ۷- اثر زوال مقاومت و کاهش سختی بر نسبت جابه‌جایی غیرالاستیک برای سیستم یک درجه آزادی تحت رکوردهای حوزه نزدیک با اثر پرتابی: الف) $\mu = 1.5$ (ب) $\mu = 4$ ، ج) $\mu = 6$ ، با اثر جهت‌داری پیش‌رونده: د) $\mu = 1.5$ (و) $\mu = 4$ (ه) $\mu = 6$



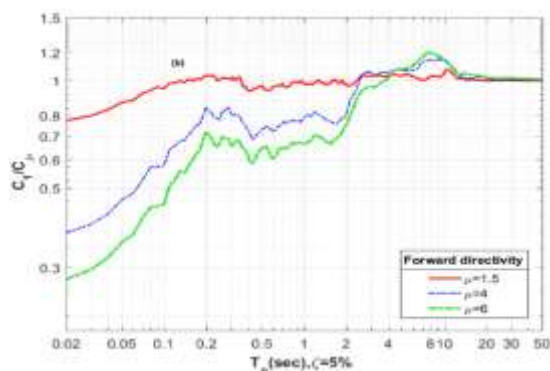
شکل ۸- اثر زوال مقاومت و کاهش سختی بر نسبت جابه‌جایی غیرالاستیک برای سیستم یک درجه آزادی تحت رکوردهای حوزه نزدیک بدون پالس: الف) $\mu = 1.5$ ، ب) $\mu = 4$ ، ج) $\mu = 6$ ، حوزه دور از گسل: د) $\mu = 1.5$ ، و) $\mu = 4$ ، ه) $\mu = 6$

۳-۵- اثر زوال بر طیف نسبت جابه‌جایی غیرالاستیک
 شکل‌های (۷) و (۸)، اثر زوال مقاومت و کاهش سختی را بر طیف نسبت جابه‌جایی غیرالاستیک با نسبت میرایی ۵ درصد و ضرایب شکل‌پذیری ۶ و ۴، ۱.۵ نشان می‌دهد.

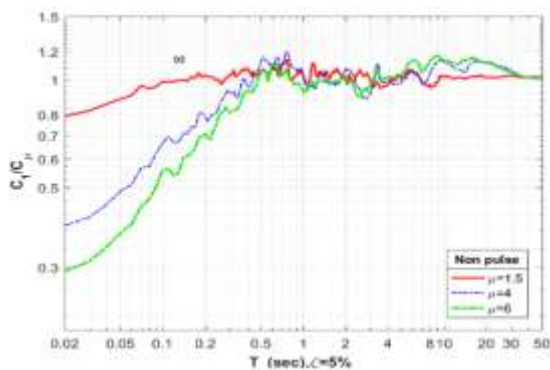
پریود پالس مدت‌زمانی است که طول می‌کشد تا یک چرخه کامل سرعت یا شتاب در تاریخچه زمانی سرعت یا شتاب رخ دهد کمتر از ۰/۵ ثانیه پریود پالس اثری بر C_{μ} ندارد و برای پریودهای ۰/۵ تا ۵ ثانیه، رکوردهای با پریود پالس بزرگ‌تر، دارای C_{μ} بیشتر بوده و برای پریودهای ۵ تا ۲۰ ثانیه بالعکس است.



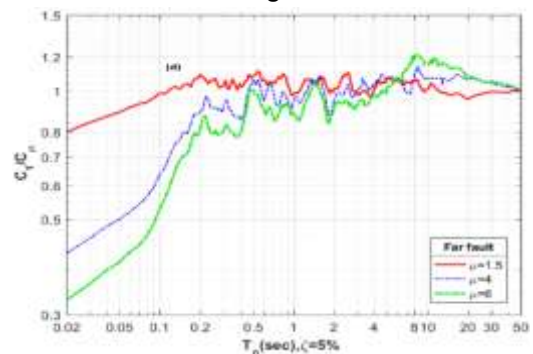
(الف)



(ب)

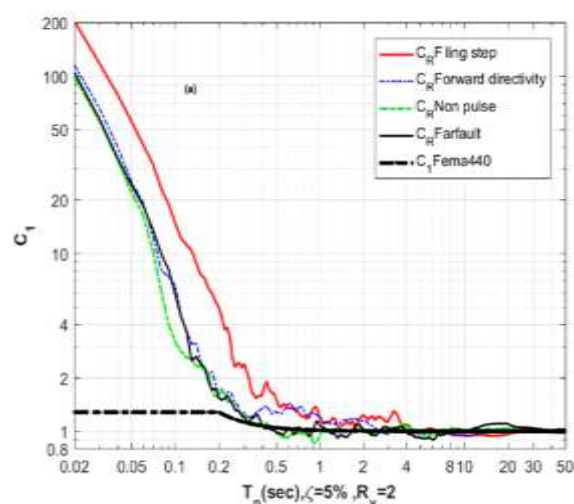


(ج)

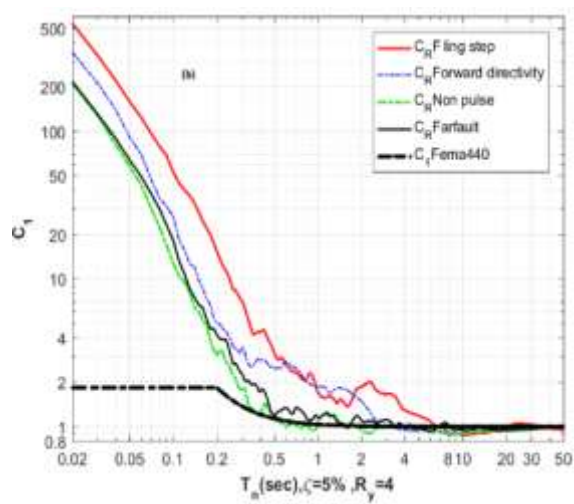


(د)

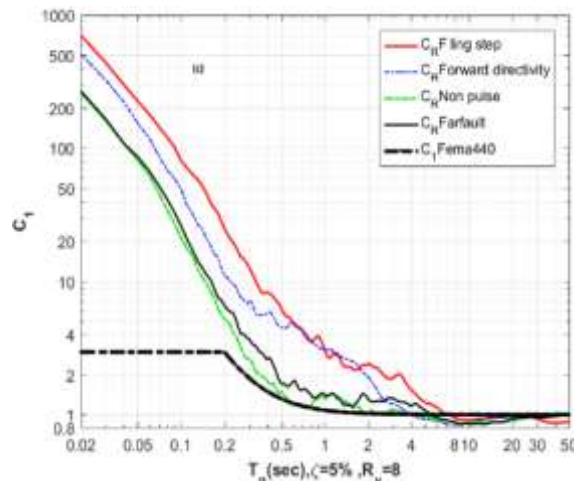
شکل ۱۰- نسبت جابه‌جایی غیرالاستیک رابطه FEMA 440 نرمالیزه شده به نسبت جابه‌جایی غیرالاستیک حاصل از این مطالعه به‌ازای ضرایب شکل‌پذیری ۱/۵، ۴ و ۶ برای سیستم‌های با میرایی ۵ درصد تحت اثر رکوردهای: الف) با اثر پرتابی، ب) با اثر جهت‌داری پیش‌رونده، ج) بدون پالس، د) حوزه دور از گسل



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۹- مقایسه نسبت جابه‌جایی غیرالاستیک به‌ازای ضرایب کاهش مقاومت برای سیستم‌های با میرایی ۵ درصد حاصل از مطالعه حاضر و رابطه FEMA 440 تحت اثر ۴ مجموعه رکورد:

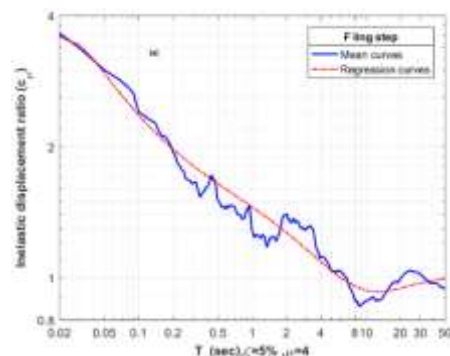
الف) $R_y=2$ ، ب) $R_y=4$ ، ج) $R_y=8$

نتایج نشان می‌دهد که برای ضریب شکل پذیری $\mu = 1.5$ ، اثر زوال ناچیز است. برای ضریب شکل پذیری $\mu = 4$ ، در مجموعه رکوردهای با اثر پرتابی در محدوده پریودهای ۰/۱۵ تا ۲ ثانیه، مقدار C_{μ} برای سیستم‌هایی با زوال حداکثر، به‌اندازه ۲۰ تا ۳۰ درصد، در رکوردهای با اثر جهت‌داری پیش‌رونده در محدوده پریودی ۰/۱ تا ۰/۳ ثانیه به‌اندازه ۲۵ درصد، در رکوردهای بدون پالس در محدوده پریودی ۰/۱ تا ۱ ثانیه به‌اندازه ۲۰ تا ۵۰ درصد و برای رکوردهای حوزه دور از گسل، در پریودهای بین ۰/۱ تا ۱ ثانیه، به اندازه ۲۰ تا ۴۰ درصد بیشتر از سیستم‌های بدون زوال چرخه‌ای می‌باشد. برای ضریب شکل پذیری $\mu = 6$ ، در مجموعه رکوردهای با اثر پرتابی در محدوده پریودهای ۰/۱ تا ۹ ثانیه، مقدار C_{μ} برای سیستم‌های با زوال حداکثر، ۲۰ درصد بیشتر از سیستم‌های بدون زوال چرخه‌ای می‌باشد که در بیشترین حالت در محدوده پریودی ۰/۲ تا ۱ ثانیه به ۵۰ درصد می‌رسد. همچنین در رکوردهایی با اثر جهت‌داری پیش‌رونده در محدوده پریودی ۰/۱ تا ۸ ثانیه این اختلاف بیشتر از ۲۰ درصد بوده که در بیشترین حالت در پریودهای ۰/۲ تا ۴ ثانیه به ۳۰ درصد می‌رسد. برای رکوردهای بدون پالس در محدوده پریودی ۰/۱ تا ۱۰ ثانیه به‌اندازه ۲۰ تا ۸۰ درصد و برای رکوردهای حوزه دور از گسل، در محدوده پریودهای بین ۰/۱ تا ۸ ثانیه، به‌اندازه ۲۰ تا ۶۰ درصد بیشتر از سیستم‌های بدون زوال چرخه‌ای می‌باشد. همچنین مشاهده شد که سیستم‌هایی که تحت اثر رکوردهای بدون پالس و حوزه دور هستند، با اعمال زوال مقاومت و کاهش سختی، میزان نسبت جابه‌جایی غیرالاستیک بیشتری را تقاضا می‌کنند. با بررسی اثر زوال چرخه‌ای بر نسبت جابه‌جایی غیرالاستیک مشاهده شد که در کل افزایش زوال چرخه‌ای باعث افزایش نسبت جابه‌جایی غیرالاستیک می‌شود. همچنین با افزایش میزان شکل پذیری سیستم یک درجه آزادی اثر زوال بر نسبت جابه‌جایی غیرالاستیک بیشتر می‌شود، یعنی سیستم‌هایی که دارای زوال چرخه‌ای هستند، با افزایش شکل پذیری سیستم در محدوده‌های پریود میانی، نسبت جابه‌جایی غیرالاستیک بیشتری در مقایسه با سیستم‌های بدون زوال دارند.

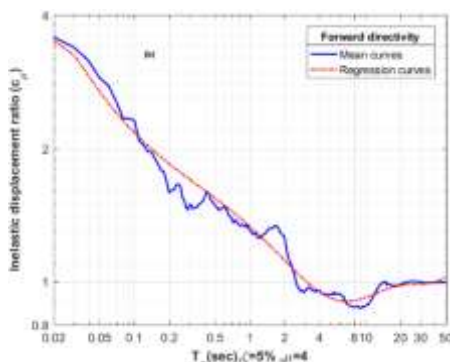
۳-۶- مقایسه C_{μ} محاسبه شده در این مطالعه با C_1 ارائه

شده در FEMA 440

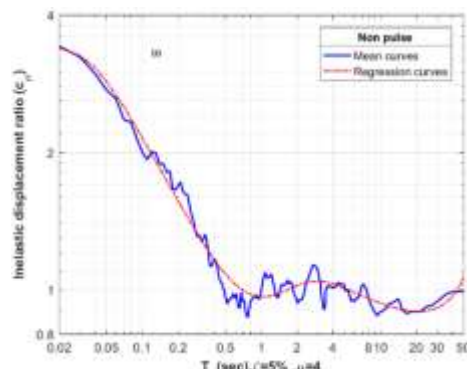
برای انجام تحلیل استاتیکی غیرخطی لازم است که تغییرمکان هدف سازه محاسبه شود. در دستورالعمل FEMA356 (BSSC 2000) برای محاسبه تغییرمکان هدف از ضرایب اصلاحی استفاده می‌شود. یکی از این ضرایب، ضریب C_1 است که تغییرمکان سیستم الاستیک خطی را به تغییرمکان سیستم غیرالاستیک تبدیل می‌کند.



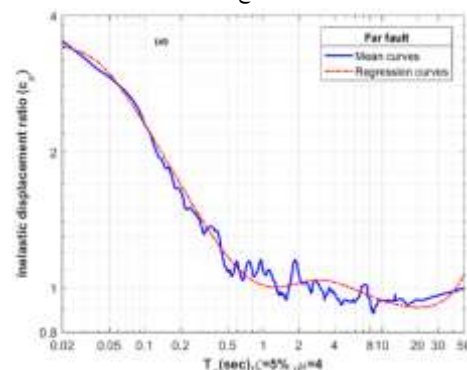
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل ۱۱- نسبت جابه‌جایی غیرالاستیک حاصل از آنالیز رگرسیون غیرخطی و مقادیر حاصل از مطالعه حاضر برای سیستم‌های یک درجه آزادی با میرایی ۵ درصد برای $\mu = 4$ تحت چهار دسته رکورد زلزله: الف) با اثر پرتابی، ب) با اثر جهت‌داری پیش‌رونده، ج) بدون پالس، د) حوزه دور از گسل

تخمین دست‌پایین در برآورد مقدار جابه‌جایی غیرالاستیک سازه می‌شود. با بررسی رکوردهای با اثر پرتابی مشخص شد که استفاده از رابطه ارائه‌شده در FEMA در محدوده پریودهای کمتر از ۱ ثانیه برای ضریب کاهش مقاومت ۲، به‌اندازه ۲۰ تا ۷۰ درصد و برای ضریب کاهش مقاومت ۴ و ۸ در محدوده زمان تناوب بین ۰/۲ تا ۴ ثانیه به‌اندازه ۲۰ تا ۹۰ درصد سبب تخمین دست‌پایین نسبت تغییرشکل غیرالاستیک سیستم یک درجه آزادی می‌شود. با توجه به این‌که شرایط ساختگاهی مورد نظر در این مطالعه اکثراً از ساختگاه C می‌باشد، مقدار α مطابق FEMA 440 برابر ۹۰ در نظر گرفته شد و مقدار به‌دست آمده در این مطالعه با مقدار C_1 پیشنهادی در FEMA 440 مقایسه شده است. با محاسبه ضریب کاهش مقاومت به‌ازای شکل‌پذیری مشخص و جایگذاری در رابطه، نسبت C_1 ارائه‌شده در FEMA 440 به مقدار C_{μ} محاسبه‌شده با استفاده از تحلیل دینامیکی غیرخطی در این مطالعه به‌ازای ضرایب شکل‌پذیری مشخص و برای چهار گروه لرزه‌ای محاسبه و در شکل (۱۰) نشان داده شده است. شکل (۱۰) نشان می‌دهد که برای کلیه گروه‌های لرزه‌ای، به‌ازای نسبت شکل‌پذیری ۱/۵، به‌استثنا محدود زمان‌های تناوب کمتر از ۰/۲ ثانیه که استفاده از ضریب C_1 در FEMA 440 حداکثر به‌اندازه ۲۰ درصد سبب تخمین دست‌پایین نسبت جابه‌جایی غیرالاستیک می‌شود، در سایر مناطق پریودی تقریباً برابر می‌باشند. همچنین مشاهده می‌شود در محدوده پریودی کمتر از ۰/۲ ثانیه، با افزایش ضریب شکل‌پذیری سیستم، رابطه FEMA 440 به‌اندازه ۲۰ تا ۷۰ درصد سبب تخمین دست‌پایین در برآورد نسبت تغییرشکل غیرالاستیک سیستم یک درجه آزادی می‌شود. با افزایش ضریب شکل‌پذیری به مقادیر ۴ و ۶ مشاهده می‌شود که رابطه FEMA 440 برای رکوردهای با اثر پرتابی در محدوده پریودهای ۰/۲ تا ۴ ثانیه، منجر به ۲۰ تا ۴۰ درصد و برای رکوردهای با اثر جهت‌داری پیش‌رونده در محدوده زمان تناوب بین ۰/۲ تا ۲ ثانیه، منجر به ۲۰ تا ۳۰ درصد، تخمین دست‌پایین در محاسبه نسبت تغییرشکل غیرالاستیک می‌شود. برای رکوردهای حوزه نزدیک بدون پالس و حوزه دور از گسل، به‌استثنای زمان‌های تناوب بین ۰/۲ تا ۰/۴ ثانیه که این نسبت به‌اندازه حداکثر ۲۰ درصد کمتر از ۱ است در سایر مناطق طیفی، رابطه ارائه‌شده در FEMA 440 تخمین قابل قبولی را برای نسبت تغییر شکل غیرالاستیک سیستم یک درجه آزادی می‌شود. نتایج به‌دست آمده از مقایسه نسبت جابه‌جایی غیرالاستیک نیاز در این مطالعه و ضریب C_1 در FEMA 440 نشان می‌دهد که رابطه FEMA 440، باعث تخمین دست‌پایین نسبت جابه‌جایی غیرالاستیک بخصوص در رکوردهای لرزه‌ای حوزه نزدیک گسل با اثر پرتابی و جهت‌داری پیش‌رونده می‌شود. نتایج به‌دست آمده در این قسمت در تناقض با نتایج به‌دست آمده از مرجع (Ruiz-Garcia, 2011) می‌باشد که در آن مرجع، رابطه (۵) باعث

$$C_1 = \begin{cases} 1 & T_e \geq T_s \\ \frac{[1+(R-1)T_s/T_e]}{R} & T_e < T_s \end{cases} \quad (۴)$$

همچنین رابطه حدی زیر نیز در برآورد ضریب C_1 باید صادق باشد:

$$C_1 = \begin{cases} 1.5 & T_e \leq 1 \text{ sec} \\ 1 & T_e \geq T_s \end{cases} \quad (۵)$$

که در این روابط T_e ، زمان تناوب سیستم یک درجه آزاد معادل و T_s ، معرف زمان تناوبی است که طیف پاسخ الاستیک را به دو بخش شتاب ثابت و سرعت ثابت تقسیم می‌کند. همچنین R ضریب کاهش مقاومت می‌باشد. در FEMA 440 (۲۰۰۵) رابطه زیر برای تعیین ضریب C_1 ارائه شد:

$$C_1 = \begin{cases} 1 & T_e \geq 1 \text{ sec} \\ 1 + \frac{(R-1)}{\alpha T_e^2} \cdot 0.2 \text{ sec} \leq T_e < 1 \text{ sec} \end{cases} \quad (۶)$$

که در این رابطه پارامترها مشابه قبل بوده و α ضریبی وابسته به نوع خاک می‌باشد. توصیه شده‌است که برای پریودهای کمتر از ۰/۲ ثانیه، مقدار ضریب C_1 ، برابر با مقدار آن در زمان تناوب ۰/۲ ثانیه فرض شود. همچنین مطابق FEMA 440 این رابطه برای رکوردهای با اثر جهت‌داری پیش‌رونده مناسب نیست. با بررسی ضریب C_1 محاسبه‌شده با استفاده از رابطه ارائه شده در FEMA 440 (رابطه (۵)) و مقدار $\frac{u_m}{u_0}$ محاسبه‌شده در این مطالعه به‌ازای ضرایب کاهش مقاومت مختلف که با C_R نشان داده شده است، مشاهده می‌شود که با توجه به شکل (۹) به‌ازای کلیه ضرایب کاهش مقاومت تسلیم، مقدار C_R در پریودهای کمتر از ۰/۲ ثانیه بسیار بیشتر از رابطه ارائه‌شده توسط FEMA 440 می‌باشد. برای رکوردهای حوزه دور از گسل و بدون پالس، به‌ازای ضریب کاهش مقاومت تسلیم ۲، به‌جز محدوده زمان تناوب کمتر از ۰/۳ ثانیه که در آن استفاده از ضریب FEMA 440 باعث تخمین دست‌پایین به‌اندازه ۲۰ تا ۳۰ درصد برآورد نسبت C_R می‌شود، در سایر زمان‌های تناوب این اختلاف به کمتر از ۱۰ درصد می‌رسد و ممکن است قدری کمتر و یا بیشتر از رابطه ارائه‌شده توسط FEMA 440 شود. با افزایش ضریب کاهش مقاومت به ۴ و ۶، مشاهده می‌شود که استفاده از رابطه FEMA 440 برای پریودهای کمتر از ۰/۶ ثانیه باعث ارزیابی دست‌پایین نسبت جابه‌جایی غیرالاستیک به‌اندازه ۲۰ تا ۶۰ درصد و برای زمان تناوب‌های بیشتر از ۴ ثانیه، باعث تخمین دست‌بالا به اندازه ۱۰ درصد می‌شود. برای سازه‌هایی که تحت اثر رکوردهای با اثر جهت‌داری پیش‌رونده قرار دارند، اگر برای محاسبه مقدار C_R از روابط FEMA 440 استفاده شود، برای ضریب کاهش مقاومت ۲، در پریودهای کمتر از ۱ ثانیه، به‌اندازه ۱۰ تا ۲۰ درصد و برای ضریب کاهش مقاومت ۴ و ۶، در زمان تناوب‌های کمتر از ۲/۵ ثانیه، به‌اندازه ۲۰ تا ۷۰ درصد سبب

جدول ۲- ثابت‌های برازش برای چهار مجموعه رکورد زلزله

Fling step	$P_{1,i}$	$P_{2,i}$	$P_{3,i}$
$i = 1$	۰/۰۱۸۲۴	-۰/۰۳۷۰۸	۰/۱۰۸۶۷
$i = 2$	۰/۰۰۹۴۲	-۰/۱۲۶۹۳	۰/۴۸۷۲۹
$i = 3$	۰/۰۰۰۱	-۰/۰۰۳۷۵	-۰/۰۱۲۷۰
$i = 4$	-۰/۰۷۲۰۱	۰/۴۰۰۹۷	-۰/۳۶۶۵۲
$i = 5$	۰/۱۲۰۵۸	-۰/۷۸۴۷۵	۱/۷۲۱۹۲
Forward directivity	$P_{1,i}$	$P_{2,i}$	$P_{3,i}$
$i = 1$	-۰/۰۰۱۷۴	۰/۰۵۸۷۹	-۰/۰۱۵۵۶
$i = 2$	۰/۰۰۶۸۴	-۰/۱۰۴۲۴	۰/۴۷۳۳۶
$i = 3$	۰/۰۰۲۲۲	-۰/۰۱۸۷۳	۰/۰۰۳۶۹
$i = 4$	-۰/۰۲۸۲۸	۰/۲۴۶۷	-۰/۱۶۴۹۲
$i = 5$	-۰/۰۰۳۳۸	-۰/۰۱۸۷۶	۰/۹۰۲۵۶
Non pulse	$P_{1,i}$	$P_{2,i}$	$P_{3,i}$
$i = 1$	۰/۰۰۶۶۲	۰/۰۷۲۳۵	-۰/۰۲۹۴۲
$i = 2$	۰/۰۰۷۳۳	-۰/۱۱۴۰۷	۰/۴۸۳۴
$i = 3$	۰/۰۰۲۶۶	-۰/۰۲۴۴۳	۰/۰۱۳۱۵۳
$i = 4$	-۰/۰۶۴۰۸	۶/۰۱۱۳۴	۱/۰۰۹۶۷
$i = 5$	۰/۰۱۹۵۴	-۰/۰۵۲۸۳	۳/۲۰۴۵۷
Far fault	$P_{1,i}$	$P_{2,i}$	$P_{3,i}$
$i = 1$	۰/۰۱۳۳۶	۰/۰۷۲	-۰/۱۰۱۰۶
$i = 2$	۰/۰۰۸۸۳	-۰/۱۳۲۱۵	۰/۵۱۶۷۵
$i = 3$	۰/۰۰۲۸۹	-۰/۰۲۴۳۷	۰/۰۱۱۲۴
$i = 4$	-۰/۱۲۷۲۳	۴/۱۶۷۹۵	-۵/۴۷۷۷۵
$i = 5$	-۰/۰۴۶۵۶	۱/۰۶۱۴	-۰/۳۸۰۴۴

ضریب تعیین R^2 یک مقیاس آماری است که نشان می‌دهد چگونه مدل رگرسیون، مدل واقعی را تخمین زده است. ضریب R^2 ، بین ۰ تا ۱ می‌باشد که مقدار ۱ نشان می‌دهد پیش‌بینی رگرسیون کاملاً مناسب داده‌ها می‌باشد. همچنین از خطای جذر میانگین مربعات (RMSE)^{۱۳} که اختلاف بین مقادیر پیش‌بینی شده توسط معادله برازش شده و مقادیر محاسبه شده واقعی را نشان می‌دهد، نیز در این مطالعه استفاده شده است. پارامتر RMSE از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (X_i - Y_i)^2} \quad (9)$$

که n تعداد داده‌ها، X_i مقادیر واقعی به دست آمده از تحلیل‌ها و Y_i مقادیر پیش‌بینی شده از برازش منحنی می‌باشد. هرچه $RMSE$ ، به سمت صفر میل کند، نشان می‌دهد که منحنی برازش داده شده بهترین منحنی می‌باشد (Khoshnoudian و همکاران، ۲۰۱۳). شکل (۱۱)، مقادیر نسبت جابه‌جایی غیرالاستیک به دست آمده از رابطه (۶) و مقادیر حاصل از تحلیل تاریخیچه زمانی غیرخطی برای چهار مجموعه رکورد لرزه‌ای را نشان می‌دهد. با توجه به جدول (۳)، نتایج نشان می‌دهد که معادله برازش شده

تخمین دست بالا در محاسبه جابه‌جایی غیرالاستیک نیاز برای سازه‌هایی شد که تحت اثر رکوردهای حوزه نزدیک از نوع جهت‌داری پیش‌رونده قرار گرفتند.

۳-۷- ارائه روابط برای نسبت جابه‌جایی غیرالاستیک

با توجه به نتایج عددی به دست آمده برای نسبت جابه‌جایی غیرالاستیک در این مطالعه و مطالعات قبل می‌توان گفت که C_μ در پیوندهای بسیار کوتاه تقریباً برابر μ و در پیوندهای بلند در حدود یک می‌باشد. بنابراین با در نظرگیری این شرایط، رابطه (۷) برای نسبت جابه‌جایی غیرالاستیک برای هر مجموعه رکورد لرزه‌ای پیشنهاد می‌شود که در آن فرض می‌گردد با توجه به تحقیقات گذشته بزرگی زلزله و فاصله از گسل، بر نسبت جابه‌جایی غیرالاستیک تأثیر ناچیزی دارد. همچنین در این مطالعه فرض می‌شود که ضریب یاد شده، تابعی از پیوند ارتعاش، نسبت شکل‌پذیری مورد نیاز سیستم یک درجه آزادی و نوع تحریک لرزه‌ای (اثر پرتابی، جهت‌داری پیش‌رونده، حوزه نزدیک بدون پالس و حوزه دور از گسل) می‌باشد. به منظور برازش منحنی از آنالیز رگرسیون غیرخطی حداقل مربعات^{۱۱} با استفاده از الگوریتم Levenberg-Marquardt در نرم‌افزار Matlab استفاده شده است. نسبت جابه‌جایی غیرالاستیک، C_μ برای چهار دسته رکورد در این مطالعه به صورت رابطه (۷) پیشنهاد می‌شود:

$$C_\mu = \left[\frac{\mu}{\left[1 + (\mu - 1)(\theta_1 + \theta_2)e^{\left(\frac{1}{T}\right)}(1 + e^{-\theta_1(T - 0.02)^{0.6}}) \right] + (\mu - 1)\theta_2 T^{0.4} - e^{-\theta_3 T^{0.8}} + \theta_4 T^2 e^{-\theta_5 T^{0.75}} \right]} \right] \quad (7)$$

در رابطه (۷)، پارامترهای θ_i ثابت‌های برازش هستند که وابسته به ضریب شکل‌پذیری و ثابت‌های $P_{1,i}$ ، $P_{2,i}$ و $P_{3,i}$ می‌باشند و با استفاده از رابطه (۸) محاسبه می‌شوند. مقادیر $P_{1,i}$ ، $P_{2,i}$ و $P_{3,i}$ برای محاسبه ثابت‌های برازش از جدول (۲) استخراج می‌شوند.

$$\theta_{i=1,2,3,4,5} = P_{1,i}\mu^2 + P_{2,i}\mu + P_{3,i} \quad (8)$$

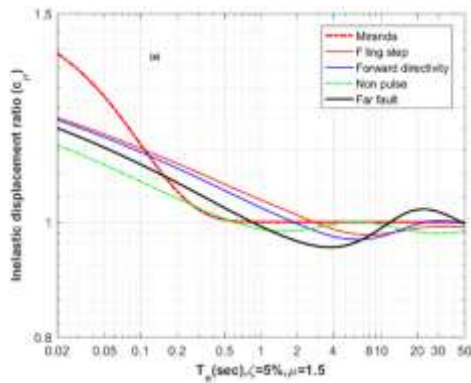
۳-۸- ارزیابی خطای رابطه پیشنهادی برای نسبت جابه‌جایی غیرالاستیک

یکی از روش‌های مشاهده میزان خطا و نزدیکی مدل برازش داده شده و مقادیر اصلی استفاده از ضریب تعیین، R^2 ، می‌باشد. در آمار، ضریب تعیین^{۱۲} نشان می‌دهد که چند درصد از تغییرات متغیر وابسته توسط متغیرهای مستقل توضیح داده می‌شود.

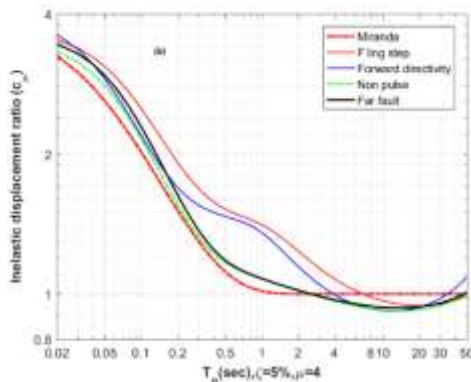
دارای دقت قابل قبولی می باشد.

جدول ۳- مقادیر خطای روابط ارائه شده برای نسبت جابه جایی غیرالاستیک تحت اثر چهار مجموعه رکورد زلزله

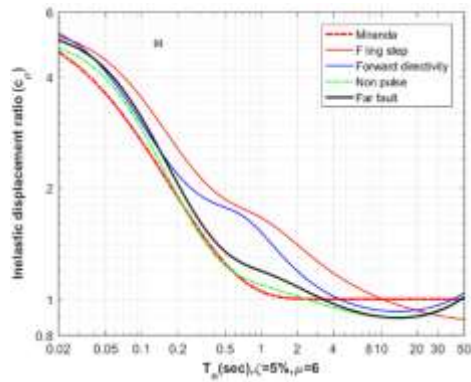
Error measure	$\mu = 1.5$		$\mu = 4$		$\mu = 6$	
	R^2	RMSE	R^2	RMSE	R^2	RMSE
step Fling	۰/۸۱	۰/۰۱۵	۰/۹۳۶	۰/۰۶۳	۰/۹۶۶	۰/۰۷۴
Forward directivity	۰/۸	۰/۰۱۶	۰/۹۵۸	۰/۰۴۳	۰/۹۸	۰/۰۴۷
Non pulse	۰/۵۷	۰/۰۲۱	۰/۹۵۴	۰/۰۳۸	۰/۹۷۶	۰/۰۴۳
Far fault	۰/۴۶	۰/۰۲۸	۰/۹۵۵	۰/۰۴۱	۰/۹۷۹	۰/۰۴۵



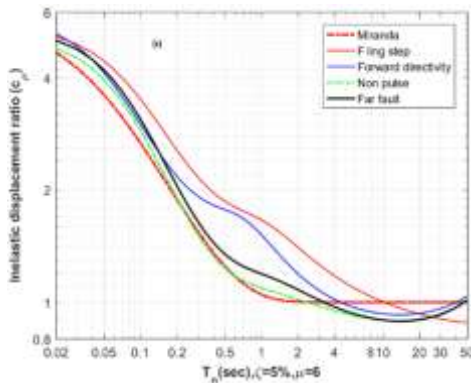
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل (۱۲) مقایسه C_{μ} حاصل از رابطه ارائه شده در این مطالعه را با رابطه ارائه شده توسط Miranda نشان می دهد (Miranda, a, b ۲۰۰۰). نتایج نشان می دهند که رابطه ارائه شده توسط Miranda به ازای ضریب شکل پذیری $\mu=1/5$ در حوزه پروده های خیلی کوتاه دارای اختلاف زیادی می باشد. همچنین برای ضریب شکل پذیری $\mu=4$ و $\mu=6$ رابطه ارائه شده توسط Miranda در حوزه پروده های متوسط تا بلند (۰/۳ تا ۲ ثانیه) دارای اختلاف زیادی با رکوردهای حوزه نزدیک دارای پالس می باشد.

۴- نتیجه گیری

محاسبه نسبت جابه جایی غیرالاستیک سازه ها، برای تعیین تغییر مکان غیرالاستیک نیاز سازه ها مهم می باشد. با توجه به مطالعات انجام شده در زمینه نسبت جابه جایی غیرالاستیک، تا به حال مطالعه ای در زمینه نسبت جابه جایی غیرالاستیک برای رکوردهای حوزه نزدیک با اثر پرتابی، بدون پالس و همچنین مقایسه این دو با رکوردهای حوزه نزدیک با اثر جهت داری پیش رونده و حوزه دور از گسل صورت نگرفته است. در این مطالعه، بررسی جامع و کاملی بر روی نسبت یاد شده صورت گرفته و پارامترهایی چون زمان تناوب، نسبت میرایی، سطح شکل پذیری، کاهش مقاومت و سختی، پرید پالس سرعت برای رکوردهای حاوی پالس بر روی سیستم های یک درجه آزاد تحت اثر چهار مجموعه رکورد زلزله، مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج به دست آمده در این مطالعه به شرح زیر می باشد:

با بررسی نسبت جابه جایی غیرالاستیک برای چهار مجموعه رکورد به ازای ضرایب کاهش مقاومت مختلف مشاهده شد که رکوردهای حوزه نزدیک حاوی پالس خصوصاً رکوردهای با اثر پرتابی میزان جابه جایی غیرالاستیک و شکل پذیری نیاز بیشتری را نسبت به رکوردهای حوزه دور و بدون پالس در محدوده پردیوهای میانی در سازه ایجاد می کنند.

شکل ۱۲- مقایسه رابطه ارائه شده توسط مطالعه Miranda و روابط ارائه شده برای نسبت جابه جایی غیرالاستیک برای چهار مجموعه رکورد زلزله: (الف) $\mu = 1.5$ ، (ب) $\mu = 4$ ، (ج) $\mu = 6$

- Chopra AK, "Dynamics of structures", 4th Edition, Prentice-Hall International Series in Civil Engineering and Engineering Mechanics, Retrieved from https://books.google.com/books/about/Dynamics_of_Structures.html?id=3cctkgEACAAJ, 2011.
- Chopra AK, Chintanapakdee C, "Comparing response of SDF systems to near-fault and far-fault earthquake motions in the context of spectral regions", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2001, 30 (12), 1769-1789. <https://doi.org/10.1002/eqe.92>.
- FEMA P695, "Quantification of building seismic performance factors". 2009, US Department of Homeland Security, FEMA.
- FEMA-356, Federal Emergency Management Agency. Building Seismic Safety Council (BSSC), NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings, Washington, D.C, 2000.
- Ibarra LF, Krawinkler H, "Global collapse of frame structures under seismic excitations", *Pacific Earthquake Engineering Research Center Berkeley, CA*, 2005.
- Ibarra LF, Medina RA, Krawinkler H, "Hysteretic models that incorporate strength and stiffness deterioration", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2005, 34 (12), 1489-1511. <https://doi.org/10.1002/eqe.495>.
- Ji D, Wen W, Zhai C, Lu D, "Inelastic displacement ratios for sdoF structures subjected to earthquake-tsunami loadings", *Journal of Earthquake Engineering*, 2022, 26 (15), 7768-7786. <https://doi.org/10.1080/13632469.2021.1982798>.
- Khoshnoudian F, Ahmadi E, Abedi Nik F, "Inelastic displacement ratios for soil-structure systems", *Engineering Structures*, 2013, 57, 453-464. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2013.09.034>.
- Li Shuai, Zhang F, Wang J, Alam, MS, Zhang J, "Effects of near-fault motions and artificial pulse-type ground motions on super-span cable-stayed bridge systems", *Journal of Bridge Engineering*, 2017, 22 (3). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0001008](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001008)
- Li Shuang, Xie L, "Effects of hanging wall and forward directivity in the 1999 Chi-Chi earthquake on inelastic displacement response of structures", *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2007a, 6 (1), 77-84. <https://doi.org/10.1007/s11803-007-0617-6>
- Li Shuang, Xie L L, "Progress and trend on near-field problems in civil engineering", *Acta Seismologica Sinica English Edition*, 2007b, 20 (1), 105-114. <https://doi.org/10.1007/S11589-007-0105-0>.
- Lignos DG, Krawinkler H, "Sideway collapse of deteriorating structural system under seismic excitations", Report 177. Ph. D. Dissertation, John A. Blume Earthquake Engineering Center, Stanford 2009.
- Miranda E, "Inelastic displacement ratios for displacement-based earthquake resistant design", 2000a, Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering.
- Miranda E, "Inelastic displacement ratios for structures
- بنابراین استفاده از روابطی که بر مبنای رکوردهای دور از گسل ارائه شده‌اند، برای محاسبه نسبت جابه‌جایی غیرالاستیک سازه‌هایی که تحت اثر رکوردهای حوزه نزدیک گسل حاوی پالس، به‌ویژه رکوردهای با اثر پرتابی، قرار می‌گیرند، مناسب نمی‌باشند. برای زمان تنب‌های کمتر از ۱۰ ثانیه، با بررسی طبقه‌بندی پریود پالس برای چهار مجموعه رکورد مشاهده شد که در کل رکوردهای با پریود پالس بزرگتر، C_{μ} بیشتری را نسبت به رکوردهای با پریود پالس کمتر در سازه ایجاد می‌کنند.
- با بررسی نتایج به‌دست آمده از نسبت جابه‌جایی غیرالاستیک در این مطالعه و مقایسه آن با روابط ارائه شده در FEMA 440، مشاهده شد که استفاده از روابط FEMA 440 باعث تخمین دست پایین جابه‌جایی غیرالاستیک نیاز برای سازه‌هایی می‌شود که تحت اثر رکوردهای حوزه نزدیک حاوی پالس، به‌ویژه رکوردهای با اثر پرتابی، قرار می‌گیرند. بنابراین در نظرگیری روابطی بر مبنای رکوردهای حاوی پالس، برای محاسبه نسبت جابه‌جایی غیرالاستیک سازه‌های واقع در نزدیک گسل، ضروری می‌باشد.
- با بررسی اثر زوال بر پارامترهای یاد شده مشاهده شد که با افزایش زوال مقاومت و سختی سازه، جابه‌جایی غیرالاستیک سازه ($\frac{u_m}{u_o}$ و C_{μ}) افزایش می‌یابد.
- با استفاده از نتایج به‌دست آمده در این مطالعه برای C_{μ} با استفاده از تحلیل رگرسیون غیرخطی، روابطی برای نسبت جابه‌جایی غیرالاستیک برای دسته‌های مختلف رکورد زلزله ارائه شد که این روابط برای خاک نوع C مناسب بوده و وابسته به شکل-پذیری، زمان تناوب سیستم و نوع رکورد زلزله می‌باشد.

۵- مراجع

- پارسائیان س م، حسینی هاشمی ب، سروقدمقدم ع، "نسبت تغییرمکان غیرالاستیک برای سازه‌های در معرض زلزله‌های پالس‌گونه حوزه نزدیک"، *مجله مهندسی عمران مدرس*، ۱۳۹۱، ۱۲ (۴)، ۲۵-۱۱.
- پورشاه م، حبیبی س، "ضریب کاهش مقاومت تسلیم و نسبت جابه‌جایی غیرالاستیک بر اساس زلزله‌های ثبت شده در ایران"، *نشریه مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تبریز*، ۱۳۹۸، ۴۹ (۳)، ۲۲-۹. <https://doi.org/10.22034/CEEJ.2019.9653>
- حسینی ن، قدرتی امیری غ، برازینیا م، سیناییان ف، "نسبت تغییرمکان غیرالاستیک برای سازه‌های در معرض زلزله‌های پالس‌گونه حوزه نزدیک"، *نشریه مهندسی عمران مدرس*، ۱۳۹۲، ۱۳ (۱)، ۲۸-۱۵.
- Adam C, "Global collapse capacity of earthquake excited multi-degree-of-freedom frame structures vulnerable to pdelta effects", In: Proc. of the Taiwan-Austria Joint Workshop on Computational Mechanics of Materials and Structures, 2008.

- on firm sites", *Journal of Structural Engineering*, 2000b, 126 (10), 1150-1159. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2000\)126:10\(1150\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2000)126:10(1150)).
- Motallebi SE, Poursha M, Norouzi A, "Strength reduction factor due to ductility for pulse-like and non-pulse-like ground motions", *Journal of Scientia Iranica* (in Press).
- Ruiz-García J, Miranda E, "Inelastic displacement ratios for design of structures on soft soils sites", *Journal of Structural Engineering*, 2004, 130 (12), 2051-2061.
- Ruiz-García J, Miranda E, "Inelastic displacement ratios for evaluation of existing structures", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2003, 32 (8), 1237-1258. <https://doi.org/10.1002/eqe.271>.
- Ruiz-García J, Miranda E, "Inelastic displacement ratios for evaluation of structures built on soft soil sites", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2006, 35 (6), 679-694, <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/eqe.552>.
- Shahi S, Baker J, "Pulse classifications from nga west2 database", 2012.
- Song J, Rodriguez-Marek A, "Sliding displacement of flexible earth slopes subject to near-fault ground motions", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2015, 141 (3), 04014110. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gt.1943-5606.0001233](https://doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0001233)
- Wen W, Zhai C, Li S, Chang, Z, Xie, L, "Constant damage inelastic displacement ratios for the near-fault pulse-like ground motions", *Engineering Structures*, 2014, 59, 599-607. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2013.11.011>.
- Zhai C, Li S, Xie L, Sun Y, "Study on inelastic displacement ratio spectra for near-fault pulse-type ground motions", *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2007, 6 (4), 351-355. <https://doi.org/10.1007/s11803-007-0755-x>.
- Zhu R, Guo T, Tesfamariam S, "Inelastic displacement demand for non-degrading bilinear SDOF oscillators with self-centering viscous-hysteretic devices", *Journal of Building Engineering*, 2022, 48, 104010. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104010>

EXTENDED ABSTRACT

Inelastic Displacement Ratio for Degrading SDOF Systems under the Effect of Pulse-like and Non-pulse-like Near-Fault Ground motions

Seyyed Ebrahim Motallebi, Mehdi Poursha*, Zohre Bohlouli

Faculty of Civil Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran

Received: 15 August 2022; Review: 01 February 2023; Accepted: 08 February 2023

Keywords:

Inelastic displacement ratio, Near-fault, Fling step, Forward directivity, Pulse-like, Non-pulse-like, Far-fault, Modified Ibarra-Medina-Krawinkler deterioration model.

1. Introduction

For the seismic evaluation of structures, it is required to determine the inelastic displacement ratio. Indeed, the inelastic displacement ratio is one of the most important coefficients in codes which is used in force-based design method as well as in performance-based seismic engineering (Miranda, 2000a, b). This study attempts to evaluate the inelastic displacement ratio, (C_{μ}), for single-degree-of-freedom (SDOF) systems that is defined as follows:

$$C_{\mu} = \frac{\Delta_{inelastic}}{\Delta_{elastic}} = \frac{u_m}{u_o} \quad (1)$$

Where u_m is the peak lateral inelastic displacement demand, and u_o is the peak lateral elastic displacement (Chopra, 2012). Several studies focused on the effect of near-fault records with forward-directivity effect on C_{μ} (Chopra & Chintanapakdee, 2001; Lu, 2012; Li et al., 2017). On the other hand, there is no research investigation to take into account the effect of fling step and non-pulse-like near-fault records. Therefore, determining the inelastic displacement ratio under the effect of these records is of great importance. The present paper aims to study the inelastic displacement ratio using far-fault and pulse-like and non-pulse-like near-fault ground motions.

2. Methodology

Single-degree-of-freedom (SDOF) systems subjected to 78 near- and far-field ground motions recorded on site classes C and D (according to NEHRP 2003) were evaluated. Near-field ground motions include records with fling step, forward directivity and non-pulse characteristics. The influence of the period of vibration of the system, pulse period, ductility level and damping ratio were also studied. Moreover, in order to investigate the effects of cyclic deterioration, the bilinear hysteretic behavior using the modified Ibarra-Medina-Krawinkler (IMK) deterioration model was used in the OpenSees software environment.

3. Results and discussion

The results indicate that C_{μ} is strongly influenced by the vibration period, ductility level, and cyclic deterioration, while the effect of damping ratio can be neglected. Similar to previous studies, the dependency of the inelastic displacement ratio on the period of the system and the level of ductility is confirmed. In addition,

* Corresponding Author

E-mail address: eb_motallebi@sut.ac.ir (Seyyed Ebrahim Motallebi), poursha@sut.ac.ir (Mehdi Poursha), z_bohllolie@sut.ac.ir (Zohre Bohlouli).

a comprehensive study was done to evaluate the C_μ ratios in the case of far-fault and pulse-like and non-pulse-like near-fault ground motion records. Finally, equations for different types of ground motion records were proposed as follows:

$$C_\mu = \left[\frac{\mu}{1 + (\mu - 1)(\theta_1 + \theta_2)e^{\left(\frac{1}{\mu}\right)}(1 + e^{-\theta_1\left(\frac{1}{T-0.02}\right)^{0.6}} + (\mu - 1)\theta_2 T^{0.4} - e^{-\theta_3 T^{0.8}} + \theta_4 T^2 e^{-\theta_5 T^{0.75}})} \right] \quad (2)$$

which θ_i is a fitting constant, dependent on the ductility and the constant values of $P_{1,i}$, $P_{2,i}$ and $P_{3,i}$. Also, θ_i is calculated according to the following formula. For instance, for the fling step records, the coefficients $P_{1,i}$, $P_{2,i}$ and $P_{3,i}$ can be derived from Table 1.

$$\theta_{i=1,2,3,4,5} = P_{1,i}\mu^2 + P_{2,i}\mu + P_{3,i} \quad (3)$$

Fig. 1 shows the inelastic displacement ratio, C_μ , based on regression analysis and the results derived from the time history analysis for the ductility level of $\mu=4$ for different types of ground motions. As shown in the figure, the proposed equation is in good agreement with those resulting from the time history analyses. Also, the results indicate that the existing equations for calculating C_μ based on far-fault ground motions cannot be directly applied to pulse-type near-fault earthquake records, especially for near-fault ground motions with fling step effect that it makes the design unsafe

Table 1. Fitting constants for fling step records

Fling step	$P_{1,i}$	$P_{2,i}$	$P_{3,i}$
$i = 1$	0.01824	-0.03708	0.10867
$i = 2$	0.00942	-0.12693	0.48729
$i = 3$	0.00010	-0.00375	-0.01270
$i = 4$	-0.07201	0.40097	-0.36652
$i = 5$	0.12058	-0.78475	1.72192

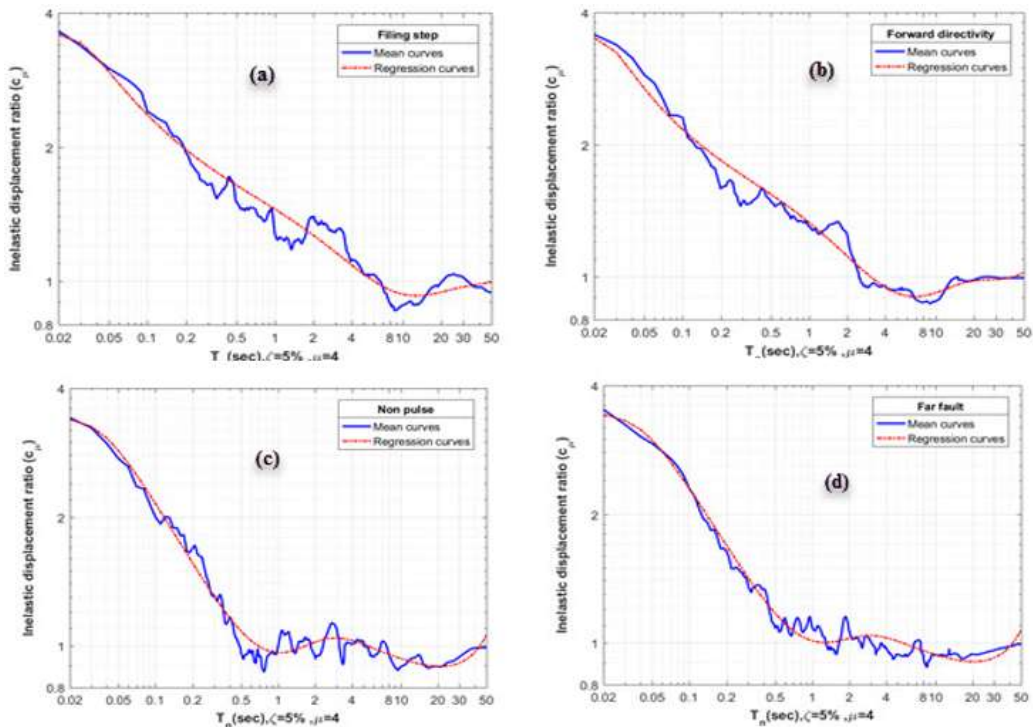


Fig. 1. Inelastic displacement ratio obtained from the time history analysis and regression analysis for $\mu=4$ under the effect of different types of ground motions: a) Fling step, b) Forward directivity, c) Non pulse, d) Far-fault records

4. Conclusions

The inelastic displacement ratio was exhaustively studied in this research investigation by using far-fault, and pulse-like and non-pulse-like near-fault ground motion records. The results show that the equation proposed by FEMA 440 underestimates the inelastic displacement ratio for near-fault records especially for fling step characteristics. Also, records with a larger pulse period lead to larger inelastic displacement ratio. The increase in the strength and stiffness deterioration increases the inelastic displacement ratio. Finally, equations were proposed for the inelastic displacement ratio in terms of the period of the system and the level of ductility by means of the nonlinear regression analysis for different types of ground motion records. The results indicate that the proposed equations predict accurately the inelastic displacement ratio.

5. References

- Chopra AK, "Dynamics of structures", Theory and Application to Earthquake Engineering, 4th Edition.
- Chopra AK, Chintanapakdee C, "Comparing response of SDF systems to near-fault and far-fault earthquake motions in the context of spectral regions", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2001, 30, 1769-1789.
- Li S, Zhang F, Wang JQ, Alam MS, Zhang J, "Effects of near-fault motions and artificial pulse-type ground motions on super-span cable-stayed bridge systems", *Journal of Bridge Engineering*, 22 (3), 04016128.
- Lu C, "Research on near-fault problems in earthquake engineering", *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 10, 1033-1039.
- Miranda E, Inelastic displacement ratios for displacement-based earthquake resistant design, *Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering*, 2000a.
- Miranda E, "Inelastic displacement ratios for structures on firm sites", *Journal of Structural Engineering*, 2000b, 126, 1150-1159.